



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÁVRH NÍZKOŠUMOVÉHO LINEÁRNÍHO LABORATORNÍHO ZDROJE

THE DESIGN LOW NOISE LINEAR POWER SUPPLY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Ondráš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zdeněk Roubal, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Michal Ondráš

ID: 154823

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Návrh nízkošumového lineárního laboratorního zdroje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou návrhu lineárního laboratorního zdroje. Navrhněte schéma zapojení řízení a nastavení výstupních hodnot laboratorního zdroje 1 x 50V/5A. Zdroj bude použit pro účely NQR, z toho plynou přísné požadavky na jeho nízký výstupní šum a dostatečné potlačení rušení od síťového napájení. Ověřte jeho šumové vlastnosti simulací v Pspice. Vyberte vhodné nízkošumové součástky.

Realizujte navržený laboratorní zdroj a měřením ověřte jeho parametry. Zvláště ověřte jeho nízké rušení od sítě a vlastní šum.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KREJČÍŘÍK, A. Napájecí zdroje I, II, III. Praha: BEN - technická literatura, 1999.

[2] NOVOTNÝ, V., VOREL, P., PATOČKA, M. Napájení elektronických zařízení. Brno: FEI VUT v Brně. 1999. ISBN 80-214-1090-6.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 30.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Roubal, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce popisuje výrobu napájecího zdroje. Je to zdroj lineární s napětovou a proudovou regulací. Výstupem práce je zdroj, který má nízký výstupní šum. Zařízení slouží jako napájecí zdroj pro nukleární kvadrupólovou rezonanci. Projekt popisuje NQR, lineární zdroj, šum, šumové vlastnosti elektrických součástek a proces výroby napájecího zdroje. Dále popisuje výběr součástek s nízkým šumem a jejich vliv na elektrický obvod a výstupní napětí, návrh chladicí soustavy zdroje a výpočet důležitých hodnot.

KLÍČOVÁ SLOVA

Napájecí zdroj, lineární zdroj, nukleární kvadrupólová rezonance, šum, regulace napětí a proudu.

ABSTRACT

This semester work describes the production of a power supply. It is linear source with voltage regulation and current regulation. The source has low output noise. The source is power supply for nuclear quadrupole resonance. This project describes NQR, linear source, noise, noise properties of electronic components and process for production of the power supply. The project describes select components with low noise and then influence on the electric circuit and output noise. The text describes design the cooling system and calculation of the values.

KEYWORDS

Power supply, linear source, nuclear quadrupole resonance, noise, voltage regulation, current regulation.

ONDRAŠ M. *Návrh nízkošumového lineárního laboratorního zdroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017. 82 s., 25 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Roubal, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh nízkošumového lineárního zdroje jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Roubalovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady, užitečné připomínky a náměty při zpracování mé bakalářské práce. Děkuji také Ing. Zoltánovi Szabó, Ph.D. za pomoc s výrobou konstrukce pro bakalářskou práci.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Obsah

Seznam obrázků	6
Seznam tabulek	9
Úvod	10
1 Popis NQR	11
1.1 Historie a současnost NQR.....	11
1.2 Obvodové zapojení.....	11
1.3 Zdroj pro NQR	12
2 Lineární zdroj	14
2.1 Síťový přívod.....	14
2.2 Vstupní filtry a odrušovací prvky.....	15
2.3 Transformátor	15
2.4 Usměrnovač	16
2.5 Filtrační kondenzátor.....	17
2.6 Filtry	17
2.7 Stabilizátor.....	18
2.7.1 Parametrický stabilizátor	18
2.7.2 Stabilizátor se zpětnou vazbou	18
2.7.3 Lineární třísvorkové stabilizátory	18
2.8 Zdroje referenčního napětí	19
3 Vlastnosti součástek - šum	20
3.1 Druhy šumu	20
3.1.1 Tepelný šum.....	20
3.1.2 Výstřelový šum	21
3.1.3 Blikavý šum	21
3.1.4 Praskavý šum	21
3.2 Šumové vlastnosti součástek	22
3.2.1 Rezistory	22
3.2.2 Potenciometry	24
3.2.3 Kondenzátory	24
3.2.4 Operační zesilovač	24
3.2.5 Zenerovy diody	25

4	Parazitní jevy	26
4.1	Rušení na vstupních obvodech	26
4.2	Úbytek napětí.....	26
4.3	Uzemnění zdroje.....	26
4.4	Oteplení součástek.....	27
4.5	Impulsní rušení	28
5	Volba Součástek	29
5.1	Zdroj referenčního napětí	29
5.2	Operační zesilovače.....	30
6	Návrh napájecího zdroje	32
6.1	Požadované parametry.....	32
6.2	Mechanická konstrukce	33
6.2.1	Zadní strana přístrojové skříně	33
6.2.2	Čelní strana přístrojové skříně	34
6.3	Návrh chlazení.....	35
6.3.1	Teoretický návrh chlazení zdroje.....	36
6.3.2	Chlazení zdroje podle vybrané varianty	39
6.4	Návrh ovládání ventilátorů	40
6.5	Návrh přepínání mezi odbočkami transformátoru.....	41
6.6	Odrušovací filtr.....	43
6.7	Transformátor	43
6.7.1	Teoretický návrh transformátoru	44
6.8	Regulace a zobrazení výstupních hodnot	47
6.8.1	Regulace a zobrazení výstupního napětí.....	48
6.8.2	Regulace a zobrazení výstupního proudu	48
6.9	Regulační část zdroje.....	48
6.9.1	Rozdílový zesilovač	49
6.9.2	Regulace napětí a proudu.....	50
7	Simulace	53
7.1	Simulace komparátoru.....	53
7.2	Simulace výstupního šumu.....	53
7.3	Simulace kmitání napětí na usměrňovací diodě	55
8	Měření navrženého zdroje	59

8.1	Měření skutečných parametrů transformátoru.....	59
8.2	Měření parametrů relé	69
8.3	Měření rušení a šumu používaného zdroje MN 40V 10A.....	70
8.4	Měření zdrojové desky	71
8.5	Měření teplotní charakteristiky zdroje při zatížení.....	72
9	Závěr	75
	Literatura	77
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	80
A.	Návrh zařízení	81
A.1	Obvodové zapojení zdrojové desky.....	81
A.2	Zdrojová deska – strana součástek	82
A.3	Zdrojová deska – strana spojů	83
A.4	Obvodové zapojení desky softstartu.....	84
A.5	Deska softstartu – strana součástek	84
A.6	Deska softstartu – strana spojů	85
A.7	Obvodové zapojení desky ventilátoru	85
A.8	Deska ventilátoru – strana součástek.....	86
A.9	Deska ventilátoru – strana spojů.....	86
A.10	Obvodové zapojení regulační desky.....	87
A.11	Regulační deska – strana součástek.....	88
A.12	Regulační deska – strana spojů.....	88
B.	Seznam součástek	89
B.1	Zdrojová deska	89
B.2	Softstart deska	92
B.3	Deska ventilátoru.....	92
B.4	Regulační deska.....	93
C.	Použité měřicí přístroje	98
D.	Fotodokumentace	99

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Blokové schéma NQR detektoru sestavené na UTEE FEKT VUT [3].	11
Obr. 2 Spektrální odezva vzorku KClO_3 na kmitočtu 28,09 MHz [4].	12
Obr. 3 Blokové schéma lineárního zdroje	14
Obr. 4 Zapojení s odrušovacím kondenzátorem	15
Obr. 5 Ochrana proti síťovému rušení	15
Obr. 6 Parazitní kapacity mezi vinutími transformátoru [12].	16
Obr. 7 Graetzův usměrňovač	17
Obr. 8 Tranzistorový vyhlazovací filtr	17
Obr. 9 Stabilizátor se zpětnou vazbou	18
Obr. 10 Třísivkový stabilizátor 78XX	19
Obr. 11 Šumový model obvodu [15]	20
Obr. 12 Praskavý šum na tlustovrstvém rezistoru [18].	21
Obr. 13 Šumový model rezistoru [15]	22
Obr. 14 Šum tlustovrstvého rezistoru 10 k Ω pro různé úrovně napětí [18]	23
Obr. 15 Porovnání hustoty šumu u několika typů rezistorů.[19].	23
Obr. 16 Průběh šumového napětí generovaného částečnými výboji v závislosti na polarizačním napětí. [20]	24
Obr. 17 Šumový model reálného operačního zesilovače [15]	25
Obr. 18 Ochrana proti pronikání rušení přes napájecí vodiče [12].	26
Obr. 19 Ukázka zapojení signálové a výkonové země v obvodu [12]	27
Obr. 20 Blokové schéma zdroje.	32
Obr. 21 Přístrojová skříň.	33
Obr. 22 Návrh zadní strany zdroje.	34
Obr. 23 Návrh čelní strany zdroje.	34
Obr. 24 Chladicí soustava pro 3 tranzistory paralelně.	36
Obr. 25 Znázornění maximálního proudu při určitých napětích na tranzistoru MJL21196 [36].	37
Obr. 26 Graf závislosti teploty tranzistoru na počtu odboček	38
Obr. 27 Srovnání výkonu na výkonových tranzistorech.	39
Obr. 28 Grafické zobrazení ztrátového výkonu v závislosti na výstupním napětí	40

Obr. 29 Schéma zapojení pro ovládání ventilátorů.....	41
Obr. 30 schéma zapojení obvodu pro ovládání relé.....	42
Obr. 31 Vnitřní zapojení odrušovacího filtru FN9290-4-06 [37]	43
Obr. 32 útlumová charakteristika filtru SCHAFFNER FN9290-4-06 vlevo a jeho provedení vpravo [37].....	43
Obr. 33 Zapojení napájecí části regulovaného zdroje.....	44
Obr. 34 Nomogram pro dvoucestný usměrňovač s RC zátěží se zakresleným výpočtem [39].....	45
Obr. 35 Úroveň magnetického rušení pro různé návrhy toroidního transformátoru	47
Obr. 36 Blokové schéma regulační části zdroje	49
Obr. 37 Rozdílový zesilovač.....	50
Obr. 38 Regulace napětí a proudu – první část.....	51
Obr. 39 Závislost přídavného proudového šumu u rezistorů výrobce Multicomp	52
Obr. 40 Regulace napětí a proudu – druhá část	52
Obr. 41 Hysterezní smyčky komparátoru pro přepínání odboček transformátoru	53
Obr. 42 Simulace šumu obvodu.....	54
Obr. 43 Závislost výstupního šumu na kapacitě kondenzátoru	54
Obr. 44 Detailní zobrazení grafické závislosti výstupního šumu na kapacitě kondenzátoru.....	55
Obr. 45 Schéma zapojení pro simulování kmitání na diodě MUR1520	55
Obr. 46 První varianta zapojení usměrňovacích diod.....	56
Obr. 47 Schéma zapojení pro simulování kmitání na diodě s paralelním kondenzátorem	56
Obr. 48 Druhá varianta zapojení usměrňovacích diod	57
Obr. 49 Schéma zapojení pro simulování kmitání na diodě s paralelním RC obvodem	57
Obr. 50 Třetí varianta zapojení usměrňovacích diod.....	58
Obr. 51 Schéma zapojení RC článku v navrhovaném zdroji.....	58
Obr. 52 Měřený transformátor vlevo, termosnímek transformátoru při plném zatížení vpravo	60
Obr. 53 Zapojení měřícího pracoviště pro měření transformátoru	60
Obr. 54 Schéma zapojení měření transformátoru naprázdno	60
Obr. 55 Průběhy napětí a proudu primárního vinutí pro 230 V (vlevo) a 253 V (vpravo)	61
Obr. 56 Zapojení pracoviště při měření malých odporů.....	62
Obr. 57 Zapojení pracoviště při měření kapacity vinutí	64
Obr. 58 Náhradní schéma transformátoru z hlediska sekundární strany	64

Obr. 59 Schéma zapojení měření transformátoru při zatížení	65
Obr. 60 Zapojení měřicího pracoviště pro měření transformátoru při zatížení	65
Obr. 61 Pracoviště pro mapování magnetického pole (vlevo) a pozice s nejvyšší hodnotou magnetické indukce (vpravo)	67
Obr. 62 Rozložení magnetického pole ve výšce 10 mm nad transformátorem v jeho dolní polovině (vlevo) a horní polovině (vpravo).....	67
Obr. 63 3D pohled na rozložení magnetického pole ve výšce 10 mm nad transformátorem.....	68
Obr. 64 Průběh magnetického pole na boku transformátoru	68
Obr. 65 Vlevo ukázka měřicího pracoviště, vpravo fotografie měřeného relé.	69
Obr. 66 Vlevo detail rušení tyristorové předregulace při výstupním napětí 30 V, vpravo opakování těchto impulsů každých 10 ms.....	70
Obr. 67 Závislost nežádoucích oscilací na výstupu zdroje pro výstupní napětí 30 V a různé odebírané proudy	70
Obr. 68 Snímek termokamery pořízený z přední strany zdroje.....	72
Obr. 69 Snímek termokamery pořízený z vrchní strany zdroje.....	73
Obr. 70 Zahřívání stabilizátorů napětí	73
Obr. 71 zahřívání chladiče a výkonového tranzistoru	73
Obr. 72 Zahřívání relé na desce softstratu	74

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Rezonanční kmitočty NQR běžných výbušnin [4]	12
Tab. 2 Srovnání hodnot zdrojů referenčního napětí	29
Tab. 3 Porovnání operačních zesilovačů část 1	30
Tab. 4 Porovnání operačních zesilovačů část 2	31
Tab. 5 Rozměry přístrojové skříně	33
Tab. 6 Přehled tepelných odporů	35
Tab. 7 Teploty chladiče tranzistoru pro 10 odboček sekundárního vinutí.....	36
Tab. 8 Teploty chladiče tranzistoru pro 5 odboček sekundárního vinutí.....	36
Tab. 9 Teploty chladiče tranzistoru pro 4 odbočky sekundárního vinutí.	37
Tab. 10 Teploty chladiče tranzistoru pro 3 odbočky sekundárního vinutí.	37
Tab. 11 Teploty chladiče tranzistoru pro 2 odbočky sekundárního vinutí.	37
Tab. 12 Maximální proudy procházející tranzistorem MJL21196 při paralelním zapojení.	37
Tab. 13 Maximální teploty na chladiči a na tranzistoru při napětí 253 V	39
Tab. 14 Obsah paměti 28C64C	41
Tab. 15 Parametry komparátorů	42
Tab. 16 Hodnoty požadovaných stejnosměrných výstupních napětí.....	44
Tab. 17 Hodnoty výstupních napětí s připočteným úbytkem napětí	45
Tab. 18 Vypočtené hodnoty napětí a proudů na sekundárních vinutích.....	47
Tab. 19 Skutečná napětí jednotlivých vinutí transformátoru naprázdno pro $U_1 = 230\text{ V}$	59
Tab. 20 Měření transformátoru naprázdno	61
Tab. 21 Naměřené hodnoty odporu primárního a sekundárního vinutí transformátoru .	62
Tab. 22 Měření rozptylové indukčnosti vinutí.....	63
Tab. 23 Měření kapacit mezi vinutími.....	63
Tab. 24 Měření kapacit vinutími.....	64
Tab. 25 Měření transformátoru při zatížení	66
Tab. 26 Skutečné, naměřené parametry použitých relé	69

ÚVOD

Nukleární kvadrupólová rezonance neboli NQR je moderní způsob, jak od sebe rozpoznat různé druhy látek. Tato metoda se v dnešní době hojně využívá v různých zařízeních a odvětvích, jako může být například letištní kontrola zavazadel. Tato bakalářská práce se zabývá návrhem napájecího zdroje pro napájení měřicí soustavy NQR.

Obsah práce je členěn do dvou základních částí. První část obsahuje teorii potřebnou k výrobě napájecího zdroje, popis a výběr vhodných součástek nebo také popis parazitních jevů a šumových vlastností obvodů. Druhá část popisuje praktickou část, tedy návrh samotného zdroje, jeho postup výroby, výpočet hodnot jednotlivých součástek a části zařízení.

První kapitola popisuje NQR metodu. Ve stručnosti je zde popsána historie NQR, využití v dnešní době a důvod vzniku. Popisují se zde také potřebné parametry pro navrhovaný zdroj.

V druhé kapitole je popsán lineární zdroj. Tato kapitola obsahuje popis jednotlivých částí lineárního zdroje a také jeho výhody oproti zdroji spínanému. Postupně jsou zde představeny důležité části zdroje, které bude obsahovat navrhovaný zdroj.

Třetí kapitola popisuje šum a jeho vliv na elektrický obvod. Je zde popsáno jak šum v obvodu potlačit. V této kapitole jsou také popsány jednotlivé součástky použité ve zdroji a jsou zde představeny jejich šumové vlastnosti.

Čtvrtá kapitola popisuje parazitní jevy. Tedy vlastnosti součástek a obvodů, které se snažíme co nejvíce omezit, a které mají negativní vliv na vyráběný zdroj. V této kapitole je také popsáno jak těmto negativním vlivům předejít.

V páté kapitole jsou mezi sebou porovnány různé součástky od mnoha výrobců, aby byla vybrána do zařízení ta nejlépe vyhovující součástka.

Šestou kapitolou končí teoretická část práce a začíná praktická. Tato kapitola popisuje základní požadované hodnoty vyráběného zdroje. Způsob výroby a také výpočty hodnot potřebných k jeho konstrukci. Je zde rozebrán návrh transformátoru, návrh přepínání mezi odbočkami transformátoru, výpočet hodnot pro chlazení zdroje a návrh chladiče a jsou zde i popsány základní části zdroje.

Sedmá kapitola popisuje a zobrazuje simulace obvodů v simulátoru Pspice. Jsou zde odsimulovány jednotlivé části zdroje.

Osmá kapitola popisuje měření jednotlivých částí vyrobeného zdroje. Jsou zde zobrazeny veškeré změřené hodnoty vyrobeného zařízení.

Poslední částí tohoto dokumentu jsou přílohy. V přílohách jsou zobrazeny veškerá schémata všech vyrobených DPS a jsou zde zapsány veškeré osazené součástky. V příloze C jsou v tabulce zobrazeny měřicí přístroje, které byly použity při měření zdroje, které je popsáno v osmé kapitole. Poslední částí příloh, částí D je fotodokumentace vyrobeného stabilizovaného zdroje.

1 POPIS NQR

Termín nukleární kvadrupólová rezonance neboli NQR je analytická metoda, která využívá speciálních vlastností atomových jader. Pomocí této metody se mohou detekovat různé druhy látek jako například výbušniny, drogy a jiné chemikálie. [1][3]

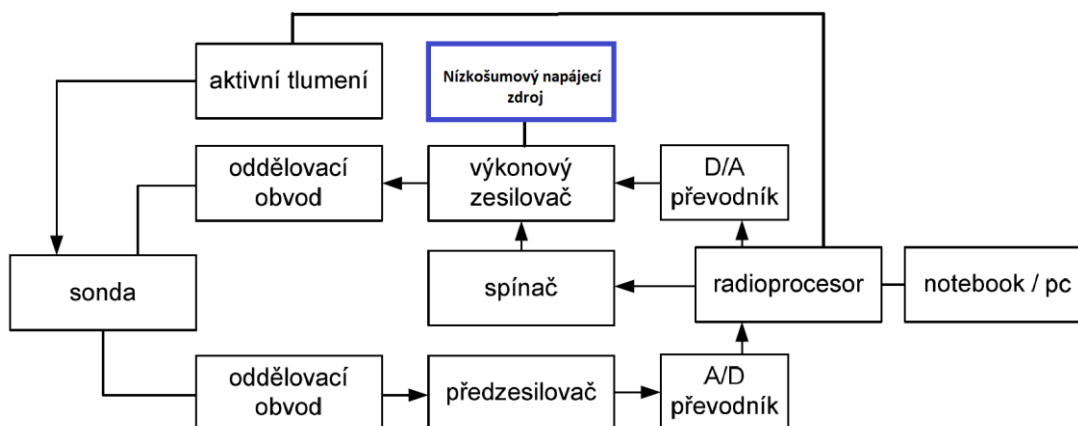
Každá látka má jedinečné vlastnosti, podle kterých ji můžeme pomocí NQR určit. Konkrétně každá látka má svůj rezonanční kmitočet a podle toho lze rozlišit od sebe různé druhy látek. Oproti jiným metodám má výhodu v tom, že nemusí zkoumat jen pevné látky, ale může detekovat i plyny a kapaliny. Tato metoda však není stoprocentní, záleží na různých faktorech, jako je například typ látky nebo vzdálenost látky od detektoru.

1.1 Historie a současnost NQR

Tato metoda se začala vyvíjet zhruba od poloviny minulého století. Zakladatelem je angličan Robert Pound. O použití se zajímala hlavně armáda, která by mohla pomocí NQR nalézt zakopané a nastražené miny. V tomto ohledu proběhlo mnoho testů. V současné době nalezlo NQR svoji roli například na letištích. Je používáno na moderních letištních terminálech v přístrojích na odhalování výbušnin v zavazadlech.

1.2 Obvodové zapojení

Obvod pro měření se skládá z měřicí sondy, což je paralelní rezonanční obvod tvořený kondenzátorem a cívkou. Dalšími obvodovými členy jsou výkonový zesilovač, vyhodnocovací obvody, počítač pro zobrazení výsledků měření a zdroj, který napájí celé zařízení. Na obr. 1 je znázorněna současná konfigurace použitá na UTEE [3]. V současné době je využit zdroj Mesit MN 10V 10A, který ovšem z důvodů rušení nevyhovuje a bude nahrazen zdrojem navrženým v následujících kapitolách.



Obr. 1 Blokové schéma NQR detektoru sestavené na UTEE FEKT VUT [3].

1.3 Zdroj pro NQR

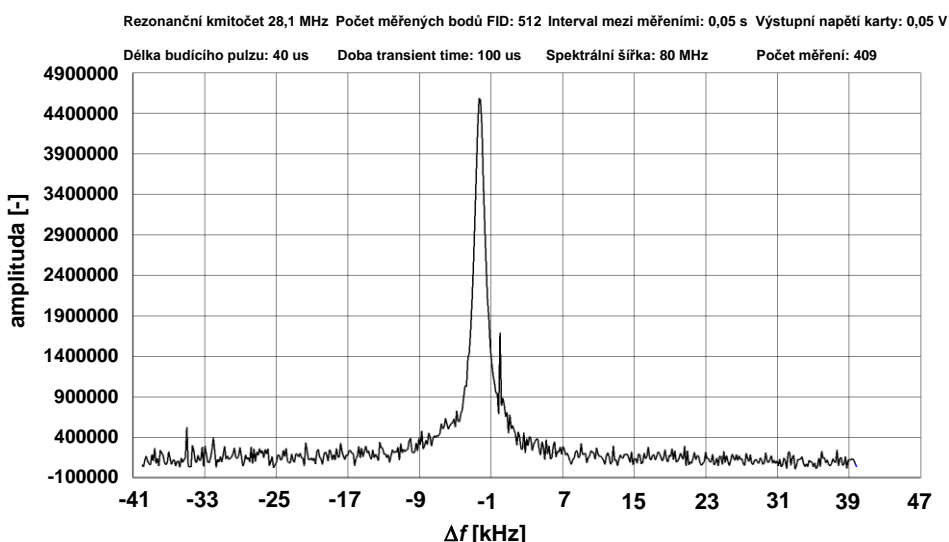
Zdroj musí splňovat určité podmínky, aby neovlivňoval samotné měření a nezkrusoval tak výsledky. Jedním ze základních vlastností, které musí zdroj splňovat je jeho nízká šumová úroveň a hodnota rušení. Vlastnosti, které mohou ovlivňovat šum ve zdroji, jsou dále popsány v kapitole 3. Zdroj NQR je sice použit k napájení výkonového zesilovače pro vysílání, ale stejně je důležité, aby nevyzařoval do svého okolí rušení při příjmu FID signálu a také, aby nevyzařoval nežádoucí signály na napájecích vodičích. Proto je koncipován jako lineární nízkošumový napájecí zdroj.

Tab. 1 zobrazuje předpokládané měřené výbušniny a ukazuje, že většina zkoumaných látek se slabým signálem FID má rezonanční kmitočet mezi 1 až 5 MHz. V tomto pásmu by tedy mělo být nejvýraznější potlačení rušení přicházející například z napájecí sítě. Pro širší využití je možné vznést požadavek na útlumové pásmo použitého odrušovacího filtru 1 až 30 MHz.

Tab. 1 Rezonanční kmitočty NQR běžných výbušnin [4]

Výbušniny	Rezonanční kmitočet [MHz]
KClO ₃	28,09
NaClO ₃	29,93
NaNO ₂	3,60 – 4,64
RDX	3,41 – 5,19
HMX	3,50 – 5,00
PETN	1,00

Na obr. 2 je příklad změřené spektrální odezvy vzorku KClO₃. Šířka spektrální čáry je přibližně 9 kHz. U navrženého zdroje je tedy kritický i nízkofrekvenční šum 1/f napájecího zdroje, který by se na změřenou spektrální odezvu mohl modulovat.



Obr. 2 Spektrální odezva vzorku KClO₃ na kmitočtu 28,09 MHz [4]

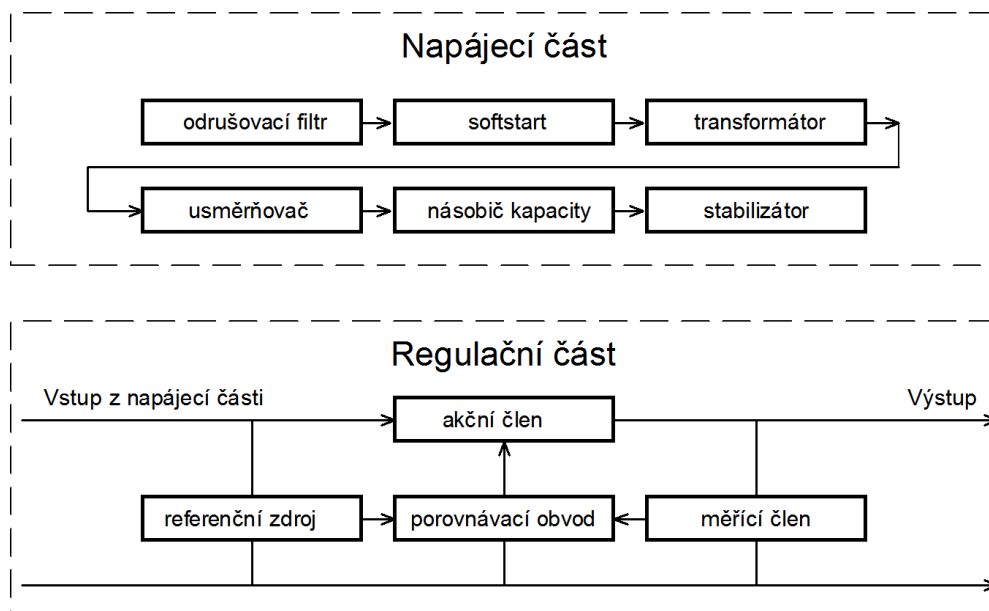
Jako napájení pro zdroj mohou být použity také baterie. Při použití baterií jako zdroje napájení se v zapojení nevyskytuje nežádoucí síťové rušení, které je třeba odfiltrvat. Nevýhodou baterií je potřeba baterie nabíjet. Navrhovaný zdroj bude mít možnost být napájen jak ze síťového zdroje, tedy z elektrické domovní sítě, tak i z baterií. Baterie se nebudou nacházet uvnitř zdroje, ale budou se k zdroji připojovat externě.

2 LINEÁRNÍ ZDROJ

Pro návrh zdroje pro měření NQR byla vybrána koncepce lineárního zdroje, které je oproti spínanému zdroji pro použití NQR výhodnější.

Mezi výhody lineárních zdrojů oproti spínaným patří to, že jsou konstrukčně jednodušší, mají nižší úroveň šumu a nevyzařují elektromagnetické záření spínacího kmitočtu jako spínané zdroje. Jejich nevýhodou je však větší hmotnost a nižší účinnost a díky těmto nevýhodám v dnešní době začínají převládat spínané zdroje. Blokové schéma lineárního zdroje je na obr. 3, kde jsou zobrazeny základní části, ze kterých se bude navrhovaný lineární zdroj skládat.

V této kapitole jsou popsány základní obvodové prvky napájecí části, jejich charakteristiky a principy využívání v praxi. Mezi tyto prvky patří filtry a odrušovací prvky, transformátory, usměrňovače a stabilizátory napětí. Všechny tyto prvky jsou v následujících kapitolách postupně popsány a charakterizovány.



Obr. 3 Blokové schéma lineárního zdroje

2.1 Síťový přívod

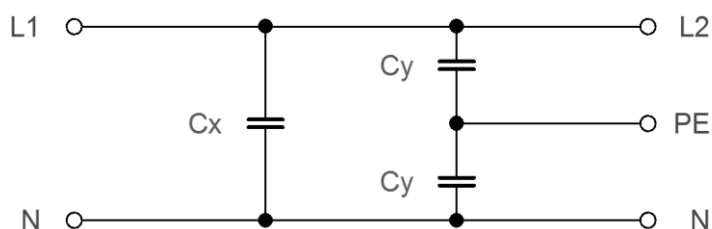
Jde o přívod síťového napájení do zdroje, tento přívod by měl být co nejkratší. Fázový vodič se vede přes pojistku, která slouží jako proudová ochrana na kontakt hlavního spínače a z tohoto spínače pokračuje dále přes vstupní filtr. Nulový vodič se připojuje na druhý kontakt spínače, aby při vypnutí přístroje byly odpojeny oba vodiče. Lze s výhodou použít stíněný napájecí síťový kabel.

2.2 Vstupní filtry a odrušovací prvky

Filtr je zařízení, jehož hlavním úkolem je ochrana zařízení před nežádoucím rušením. Filtr se v obvodu zdroje zapojuje za i před transformátor a tím vzniká vstupní filtr. Vývody u odrušovacích prvků musí být co nejkratší, aby nedocházelo ke zvětšení impedance nebo aby se nezhoršila účinnost filtrace.

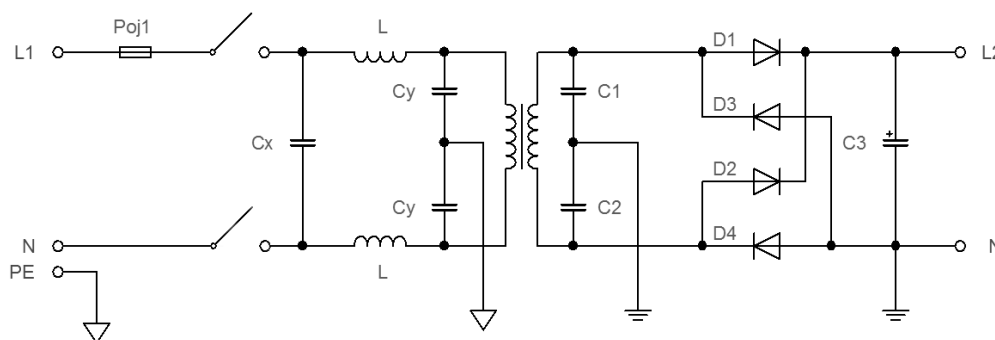
Nejjednodušším typem filtru je LC filtr. LC filtr je také možné zapojit jako odrušovací filtr mezi síť a transformátor.

Dalším odrušovacím prvkem je odrušovací kondenzátor. Jeho schéma je znázorněno na obr. 4. Průrazem kondenzátoru C_Y by se živý vodič spojil s kostrou a tím by mohlo vzniknout nebezpečí úrazu elektrickým proudem pro obsluhu. Proto se klade na tento kondenzátor velký důraz a je testován vysokým zkušebním napětím.



Obr. 4 Zapojení s odrušovacím kondenzátorem

Spojením odrušovacího kondenzátoru a odrušovacího filtru LC vzniká ochrana proti pronikání rušení ze sítě, která částečně brání i pronikání rušení z přístroje zpět do sítě. Způsob zapojení je uveden na obr. 5.



Obr. 5 Ochrana proti síťovému rušení

2.3 Transformátor

Transformátor je zařízení, které slouží k přeměně hodnoty vstupního střídavého napětí na námi požadovanou hodnotu výstupního střídavého napětí. Skládá se z jednoho primárního vinutí a jednoho nebo více sekundárních vinutí.

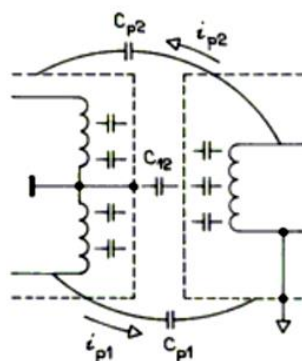
Transformátor je sestaven ze dvou základních částí jádra a vinutí. Jádro je vyrobeno z feromagneticky měkkých materiálů a to nejčastěji z feromagnetických

plechů, vinutých nebo feritových jader. Vinutí se dělí na primární a sekundární a je realizováno pomocí izolovaného měděného vodiče. Primární vinutí je připojeno na vstupní svorky U_{IN} a sekundární vinutí je připojeno na výstupní svorky U_{OUT} .

Pokud to obvod vyžaduje, může mít transformátor i více sekundárních vinutí. Více sekundárních vinutí se používá například, má-li každá část zařízení své rozlišné napájecí požadavky. Konkrétní návrh transformátoru je podrobně popsán v kapitole 6.

V případě, že může v aplikaci výrazně vadit vyzařování elektromagnetického pole transformátoru do okolí, je výhodné volit nižší sycení magnetického jádra. To má za příznivý následek i nižší podíl vyšších harmonických napájecího proudu.

Mezi primárním a sekundárním vinutím se může střídavá složka přenášet pomocí parazitní kapacity mezi vinutími. Tomuto se dá zabránit stíněním obou vinutí. Stínění vinutí musí být připojeny k rozdílným uzemněním. Na obr. 6 jsou ukázány parazitní kapacity mezi vinutími. Přidáním stínění se zmenší kapacita C_{P1} a C_{P2} , ale zvětší se kapacita C_{I2} . Stínění lze provést pomocí měděné fólie.



Obr. 6 Parazitní kapacity mezi vinutími transformátoru [12]

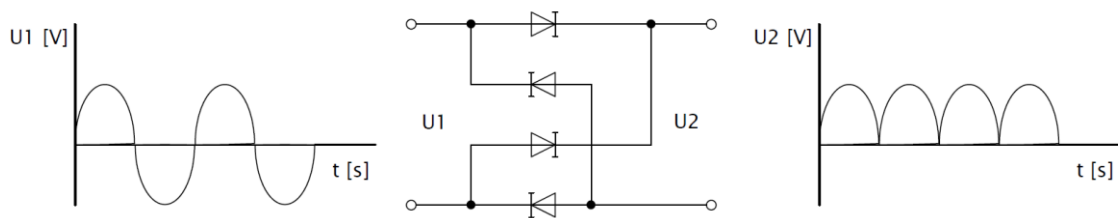
2.4 Usměrňovač

Usměrňovač slouží k usměrnění střídavého napětí. Po průchodu střídavého napětí usměrňovačem vznikne na výstupu stejnosměrné napětí. K usměrňování napětí se nejčastěji používají polovodičové diody. Existuje několik typů usměrňovačů. Například jednocestný usměrňovač, dvoucestný nebo můstkový usměrňovač tzv. Graetzův usměrňovací můstek, který bude použit i v tomto projektu. Na obr. 7 je zobrazena vstupní i výstupní charakteristika i zapojení usměrňovače.

Usměrňovací diody volíme takové, aby proud procházející do zátěže mohl procházet všemi diodami v usměrňovači. Pro výpočet vrcholového napětí U_M na výstupu usměrňovače bez zátěže slouží vztah 2.1.

$$U_M = U_g \cdot \sqrt{2} \quad [V] \quad (2.1)$$

- U_M udává vrcholovou hodnotu střídavého napětí
- U_g je vstupní střídavé napětí.



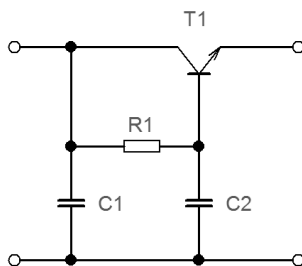
Obr. 7 Graetzův usměrňovač

2.5 Filtrační kondenzátor

Někdy je nazýván také jako sběrací kondenzátor. Filtrační kondenzátor je nejjednodušším filtračním prvkem a zapojuje se paralelně k výstupu usměrňovače. Používá se elektrolytický kondenzátor s velkou kapacitou, který slouží k vyhlazení vstupního napětí. Čím větší je kapacita, tím menší je zvlnění. Kondenzátor, který je zapojen za usměrňovač se nazývá sběrací kondenzátor. Vybití kondenzátoru po vypnutí zdroje zajistíme výkonovým rezistorem k němu paralelně připojeným.

2.6 Filtry

Pro velmi citlivé obvody se musí napětí za filtračním kondenzátorem dále filtrovat. Existuje několik druhů filtrů, jako jsou například odporový filtr, tlumivkový vyhlazovací filtr nebo tranzistorový vyhlazovací filtr. Odporový filtr je velmi používaný díky své jednoduchosti a ceně. Jeho nevýhodou je však úbytek napětí na rezistoru, který může v některých zapojeních působit velmi negativně. Tlumivkový filtr, který se může zapojovat za filtrační kondenzátor, je velmi účinný v potlačení střídavé složky. Jeho nevýhodou je však velká cena a rozměry oproti odporovému vyhlazovacímu filtru. Předchozí dva typy filtrů se řadí do kategorie pasivních filtrů. Přidáním aktivního prvku vznikne aktivní filtr, tedy tranzistorový vyhlazovací filtr. Někdy bývá nazýván jako násobič kapacity. Pomocí tohoto filtru můžeme zmenšit hmotnosti a rozměry vyhlazovacích filtrů. Přidáním tranzistoru k odporovému vyhlazovacímu filtru můžeme zmenšit hodnotu kondenzátoru C a zachovat při tom stejný činitel filtrace. Lze tomu tak udělat i v případě tlumivkového vyhlazovacího filtru. Na obr. 8 je zobrazen tranzistorový vyhlazovací filtr s odporem.



Obr. 8 Tranzistorový vyhlazovací filtr

2.7 Stabilizátor

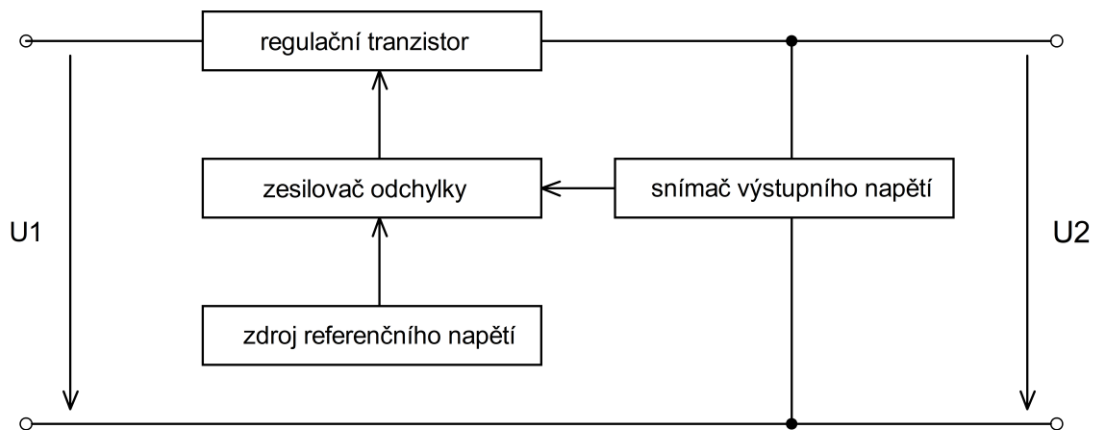
Pod pojmem stabilizátor si můžeme představit elektronický obvod, který má za úkol udržet na výstupu stejné výstupní napětí jak při zatížení obvodu zatěžovacím odporem, tak i při kolísání vstupního napětí. Měl by mít tedy nepatrný přenos změn vstupního napětí na výstupní [8]. Stabilizátory dělíme na dva základní typy, parametrický stabilizátor a stabilizátor se zpětnou vazbou.

2.7.1 Parametrický stabilizátor

Parametrické stabilizátory pracují na principu rozdílu mezi stejnosměrným a dynamickým odporem stabilizačního prvku. Dále se rozdělují na stabilizátory napětí nebo proudu a podle zapojení na sériové nebo paralelní. Nevýhodou parametrických stabilizátorů je malý výstupní výkon. Mezi parametrické stabilizátory patří například stabilizátor se Zenerovou diodou, kde se využívá vlastností diody v závěrném směru, přesněji její voltampérové charakteristiky.

2.7.2 Stabilizátor se zpětnou vazbou

Tento stabilizátor pracuje s aktivními prvky a zavádí zpětnou vazbu v obvodu, čímž zlepšuje stabilizaci výstupní veličiny. Ke své činnosti využívá tento typ stabilizátoru zdroj referenčního napětí, který se skládá z parametrického stabilizátoru. Obvod stabilizátoru se zpětnou vazbou se skládá z regulačního tranzistoru, snímače výstupního napětí, zesilovače odchylky a zdroje referenčního napětí. Schéma obvodu je na obr. 9.

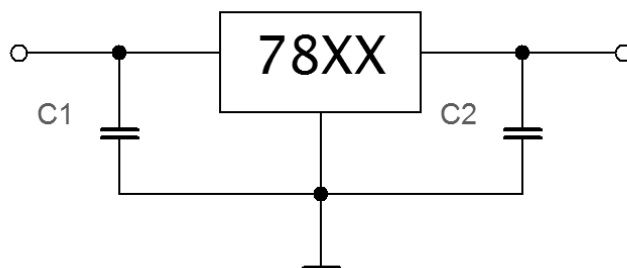


Obr. 9 Stabilizátor se zpětnou vazbou

2.7.3 Lineární třísvorkové stabilizátory

Jde o velmi jednoduché a cenově dostupné stabilizátory, které můžeme rozdělit na kladné a záporné. Kladné bývají používány pro získání kladného napětí a záporné pro získání záporného napětí. Jako příklad těchto stabilizátorů jsou stabilizátory 78XX a 79XX. Stabilizátor 78XX slouží pro získání kladného napětí v několika různých pevně daných velikostech například pro 5V a 12V můžeme použít 7805, 7812. Stabilizátor

79XX je velmi podobný, jen slouží pro získání záporného napětí. Na obr. 10 je základní zapojení třísvorkového stabilizátoru 78XX.



Obr. 10 Třísvorkový stabilizátor 78XX

2.8 Zdroje referenčního napětí

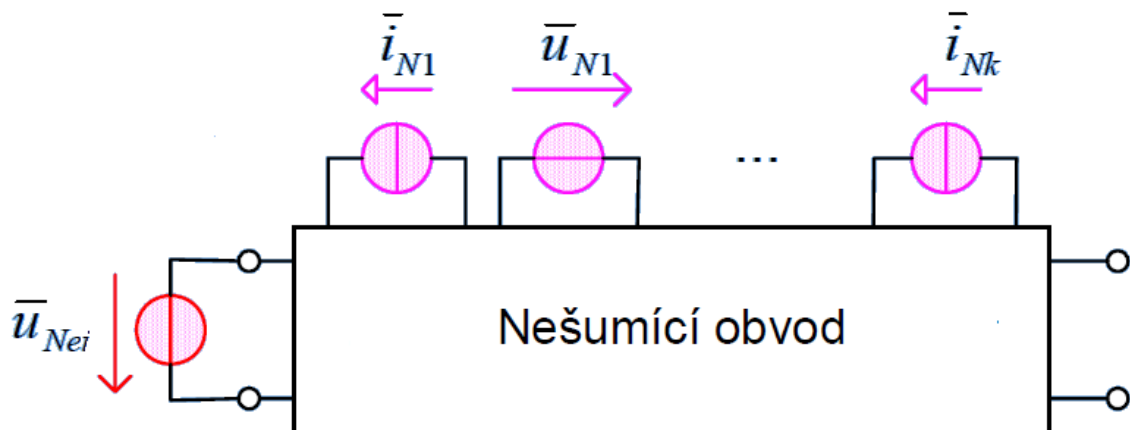
Zdroje referenčního napětí jsou obvody, které mají stále stejné výstupní (referenční) napětí. V obvodech se používají k porovnávání různých napětí, tedy k porovnání známého (referenčního) napětí a neznámého napětí. Proto musí referenční zdroj splňovat několik kritérií - dobrou přesnost, teplotní drift, stabilitu a nesmí do obvodu vnášet šum. Přesností se rozumí odchylka výstupního napětí, tedy například při výstupním referenčním napětí $U=10\text{V}$ s přesností 5% se může výstupní napětí pohybovat v rozmezí 9,5V až 10,5V. Teplotní drift je hodnota, která ukazuje, jak se bude měnit výstupní veličina se změnou teploty. Stabilita určuje, jak se bude měnit výstupní napětí v čase, tedy když bude součástka stárnout.

3 VLASTNOSTI SOUČÁSTEK - ŠUM

Šum je náhodný signál, u kterého nemůžeme vyjádřit přesnou výchylku v čase a vzniká jako nechtěný produkt při přenosu signálu. Šum můžeme rozdělit na interní a externí. Externí šum přichází do zařízení z venku, zatímco interní šum vzniká uvnitř zařízení.

V elektrotechnických obvodech vznikají dva základní druhy šumu. Bílý šum, který má rovnoměrně rozložené spektrum nezávislé na kmitočtu a barevný šum, u kterého je to přesně naopak. Tedy spektrum není rozloženo rovnoměrně v kmitočtové oblasti.

Pro zjištění šumu obvodu se používá šumová analýza, která pracuje se šumovými modely obvodu, kde je použit ideální nešumící obvod a zdroje šumu se nahrazují zdroji napětovými a proudovými. Ukázka šumového modelu obvodu je na obr. 11.



Obr. 11 Šumový model obvodu [15]

3.1 Druhy šumu

Šumy se dělí na několik druhů, některé z nich jsou popsány v této kapitole. Celkový šum je dán součtem všech dílčích šumů podle vztahu 3.1.

$$i_x = \sqrt{i_1^2 + i_2^2 + i_3^2} \quad (3.1)$$

3.1.1 Tepelný šum

Někdy nazýván také jako termický nebo Johnsonův šum. Má charakter bílého šumu a nachází se ve všech součástkách, kde dochází k volnému pohybu elektronů. Při teplotě vyšší než absolutní nula dochází k výrobě tepelného šumu. Tepelný šum můžeme vyjádřit pomocí následujícího vzorce.

$$u^2 = 4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot B_N \quad (3.2)$$

- k je Boltzmanova konstanta, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ [J/K]

- T je teplota udávaná v kelvinech
- R je odpor rezistoru
- B_N je šumová šířka pásma

3.1.2 Výstřelový šum

Výstřelový šum se vyskytuje u součástek s PN přechodem a vytváří ho nosiče náboje. Má charakter bílého šumu a je přímo úměrný protékajícímu proudu I a šířce pásma B .

$$i^2 = 2 \cdot q \cdot I \cdot B_N \quad (3.3)$$

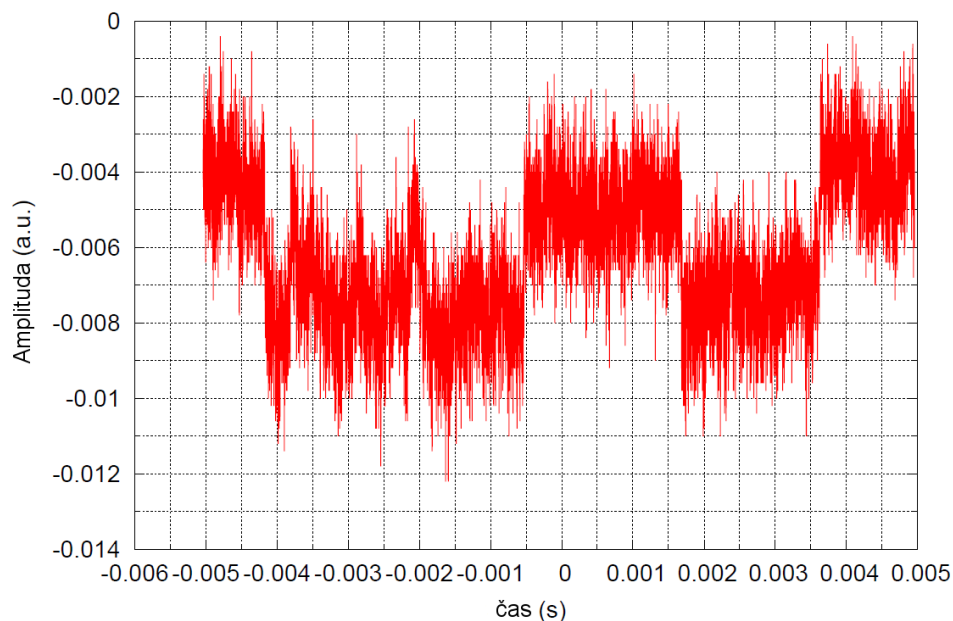
- q je náboj elektronu $q = 1,602 \cdot 10^{-19} [C]$
- I je stejnosměrný proud protékající přes PN přechod
- B_N je šumová šířka pásma

3.1.3 Blikavý šum

Někdy nazýván také jako šum typu $1/f$. U polovodičů je spojen nejčastěji s množstvím nečistot v krystalové mřížce a je závislý na proudu procházejícím polovodičem. Vyskytuje se ale také u všech ostatních elektronických součástek. Uplatňuje se na nižších kmitočtech.

3.1.4 Praskavý šum

Tento šum je vytvořen znečištěním oblasti emitoru a vzniká hlavně na přechodu báze – emitor. Má charakter šumu $1/f^2$. Na obr. 12 je zobrazen praskavý šum na tlustovrstvém rezistoru.



Obr. 12 Praskavý šum na tlustovrstvém rezistoru [18]

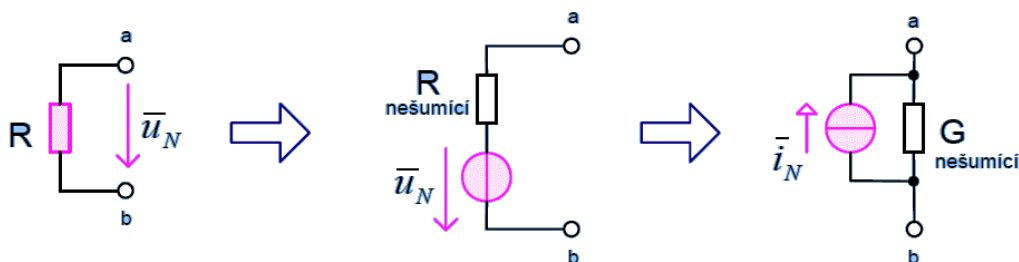
3.2 Šumové vlastnosti součástek

Šumové vlastnosti součástek jsou dány výrobními procedurami a konstrukční přesností výroby součástek. V této kapitole jsou popsány nejčastější šumové vlastnosti součástek, které jsou použity v tomto projektu.

3.2.1 Rezistory

U rezistorů se projevuje nejčastěji tepelný šum a proudový šum. Přídavný proudový šum se začíná projevovat na rezistoru při zatížení stejnosměrným proudem a je přímo úměrný proudu protékajícímu rezistorem. Proudový šum rezistorů má charakter blikavého šumu. Šum je obecně menší u rezistorů s napájenými vývody. Drátové rezistory mají lepší šumové vlastnosti. Nevhodné pro nízkošumové aplikace jsou uhlíkové rezistory a SMD tlustovrstvé rezistory. Hodnotu proudového šumu udává výrobce a určuje tím kvalitu rezistoru.

Pro výpočty a modelování šumových obvodů můžeme reálný šumící obvod nahradit modelem. Model šumícího rezistoru se skládá z ideálního nešumícího rezistoru a zdroje šumu. Znázorněno na obr. 13, kde obrázek vlevo ukazuje reálný rezistor, prostřední obrázek ukazuje ideální rezistor se zdrojem napětí jako zdrojem šumu a obrázek vpravo znázorňuje ideální rezistor a proudový zdroj jako zdroj šumu.



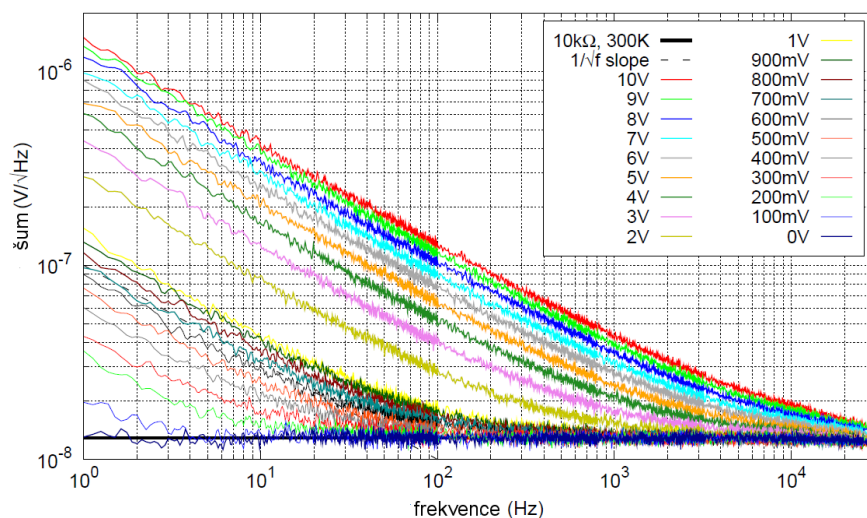
Obr. 13 Šumový model rezistoru [15]

Míra šumu se udává v $\mu\text{V/V}$ a měří se podle normy pro šumovou šířku pásma 1 kHz s geometrickým středem pásmové propusti 1 kHz. Jedná se tedy o kmitočtové pásmo 618 až 1618 Hz. Na rezistor se připojí stejnosměrné napětí a měří se na něm šum, pomocí voltmetru měřící skutečnou efektivní hodnotu. Tato hodnota může být přepočítána také na decibely a to pomocí vztahu 3.4.

$$NI = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{U_{\text{rms}}}{U_{\text{DC}}} \right) \quad (3.4)$$

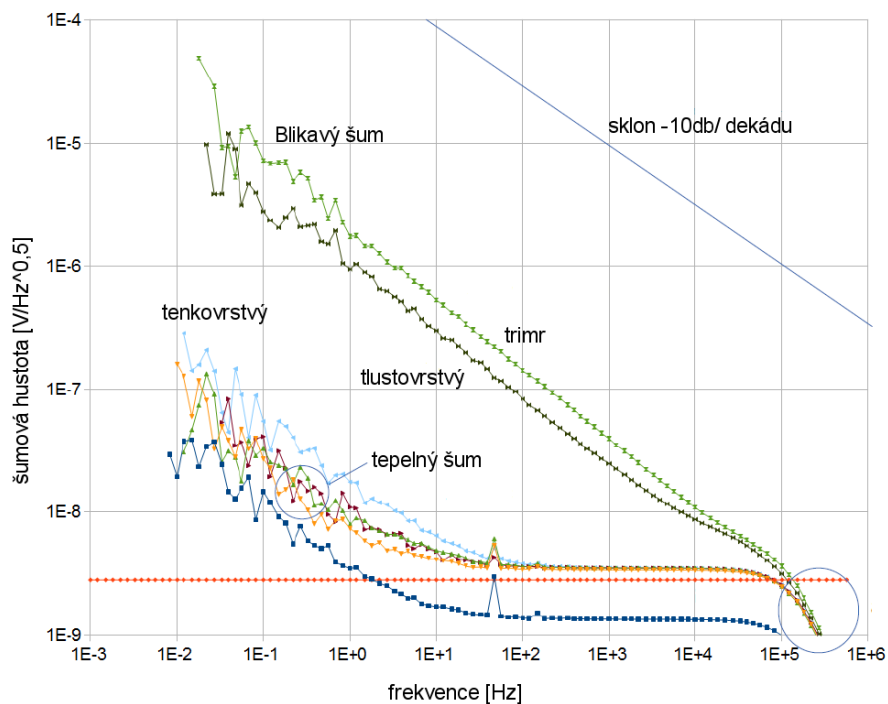
- U_{rms} je efektivní hodnota napěťového šumu
- U_{DC} je úbytek napětí na rezistoru

Na obr. 14 je znázorněna změna charakteru spektrální hustoty šumu pro tlustovrstvý rezistor 10 k Ω při změně stejnosměrného napájecího napětí od 0 V po 10 V.



Obr. 14 Šum tlustovrstvého rezistoru 10 kΩ pro různé úrovně napětí [18]

Na obr. 15 je znázorněn rozdíl v šumových vlastnostech několika typů rezistorů. Je zde uveden nastavitelný odpor, neboli trimr, tlustovrstvý rezistor a tenkovrstvý rezistor. Červená křivka vyjadřuje teoretickou hodnotu tepelného šumu rezistoru $R=470\ \Omega$. Na měřené rezistory bylo připojeno stejnosměrné napětí $U_{DC}=11,5\text{ V}$. Modře je zobrazena spektrální hustota šumu samotné měřicí aparatury při zkratu. Tenkovrstvé rezistory se blíží teoretické hodnotě tepelného šumu, změřený šum $1/f$ na nízkých kmitočtech je dán vlastnostmi měřicí aparatury. Naopak tlustovrstvý rezistor a cermetový trimr v celém kmitočtovém pásmu vykazují výrazně vyšší spektrální hustotu šumového napětí a převládá přídavná proudová složka šumu rezistoru.



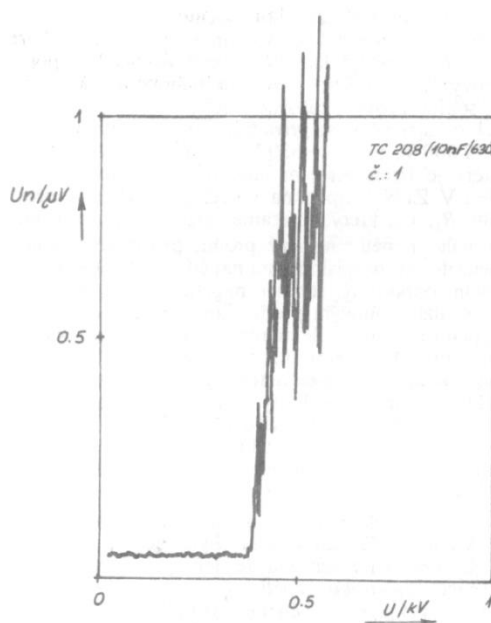
Obr. 15 Porovnání hustoty šumu u několika typů rezistorů.[19]

3.2.2 Potenciometry

U potenciometrů se nejvíce projevuje šum při změně hodnoty odporu, tedy při jeho přetáčení. Nejvhodnější variantou je drátový potenciometr. U potenciometru se udává ekvivalentní šumový odpor sběrače.

3.2.3 Kondenzátory

Šumové vlastnosti kondenzátoru jsou ovlivněny technologickým postupem výroby a může se u nich projevovat tepelný a polarizační šum. V kondenzátoru, který je v tepelné rovnováze s okolím vzniká Nyquistův tepelný šum. Polarizační šum vzniká na kondenzátoru, připojíme-li na kondenzátor napětí. Vzniká v izolační vrstvě. Nepříliš vhodné jsou kondenzátory elektrolytické pro časové a teplotní změny jejich svodového proudu. U kondenzátorů s dielektrikem z metalizované plastové fólie může dojít při napětí blízcím se jmenovitému napětí kondenzátoru k částečným výbojům zvyšujícím jeho šumové napětí. Příklad závislosti šumového napětí na polarizačním napětí u kondenzátoru Tesla TC 208 10nF/630V je na obr. 16. Pro nízkošumové aplikace je dobré volit s určitou rezervou jmenovité napětí kondenzátoru, aby k částečným výbojům nedocházelo.

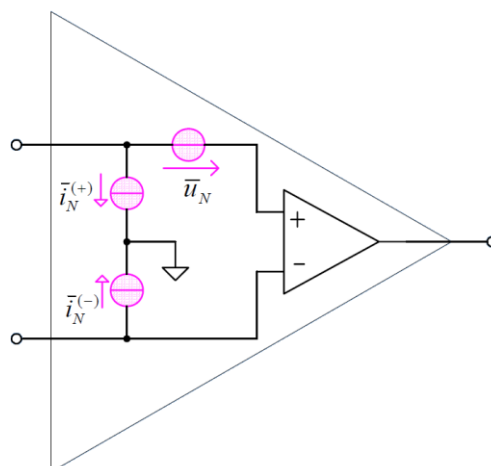


Obr. 16 Průběh šumového napětí generovaného částečnými výboji v závislosti na polarizačním napětí. [20]

3.2.4 Operační zesilovač

U operačních zesilovačů zaznamenáváme tepelný, výstřelový, blikavý a praskavý šum. Snížit velikost těchto šumů můžeme výběrem správného operačního zesilovače nebo jeho zapojením. Výrobci udávají v katalogových listech šumové hodnoty každého operačního zesilovače.

Šum v OZ můžeme také modelovat pomocí šumového modelu. Takovýto model je na obr. 17, kde jsou šумы nahrazeny dvěma proudovými zdroji a jedním napěťovým.



Obr. 17 Šumový model reálného operačního zesilovače [15]

3.2.5 Zenerovy diody

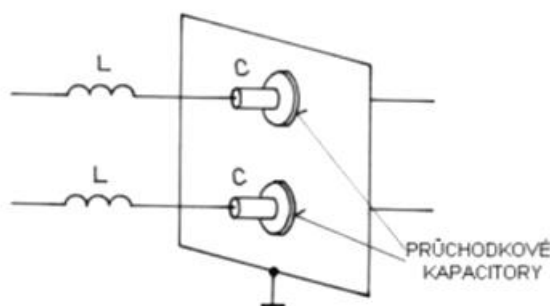
U Zenerovy diody vzniká blikavý šum. Velikost šumu závisí na postupech výroby diody. Obecně diody v SMD pouzdře mají lepší šumové vlastnosti než diody v pouzdře klasickém. Šum Zenerových diod v závěrné oblasti výrazně závisí na proudu jím procházejícím a na velikosti jejich stabilizačního napětí.

4 PARAZITNÍ JEVY

Parazitními jevy rozumíme vlastnosti obvodů nebo součástek v obvodu, které nechtěně ovlivňují námi vytvořené zařízení, a proto jsou nežádoucí. V této kapitole budou probrány základní typy parazitních jevů a doporučení jak jim předejít.

4.1 Rušení na vstupních obvodech

Rušení na vstupních obvodech se může vyskytnout ve chvíli, kdy se vstupní přívod začne chovat jako vysokofrekvenční vedení a začne se na něm indukovat vysokofrekvenční rušení. Takovéto rušení může ovlivnit nízkofrekvenční nebo i stejnosměrný vstupní signál. Jako ochrana se používá filtr složený z tlumivek a průchodkových kondenzátorů, který je zobrazen na obr. 18.



Obr. 18 Ochrana proti pronikání rušení přes napájecí vodiče [12]

4.2 Úbytek napětí

Když jsou mezi zátěží a zdrojem velmi dlouhé přívodní kabely, může docházet k úbytku napětí na kabelech. Tento stejný problém se může projevit i uvnitř zdroje, kdy se úbytky napětí mohou projevit mezi součástkami, na vývodech součástek, ale také i na samotných součástkách. Proto je potřeba s úbytkem napětí počítat již při konstrukci zdroje a počítání napětí na sekundárním vývodu transformátoru. Vstupní napětí by mělo být o úbytek napětí obvodu větší než námi požadované výstupní napětí na zátěži.

Zemní vodiče by měly být co nejkratší, aby se na nich neuplatňoval úbytek napětí. Správným uzemněním se může odstranit rušivý úbytek napětí.

4.3 Uzemnění zdroje

Správné uzemnění zdroje je velmi důležité, protože jinak mohou nastat problémy v podobě úbytků napětí na zemnicích vodičích nebo se zvětší šum obvodu. Zemnicí vodič by měl mít co nejmenší odpor. Toho lze dosáhnout použitím správných materiálů

vodičů a také správných průřezů vodičů. Na desce plošných spojů by měl být zemní vodič co nejširší.

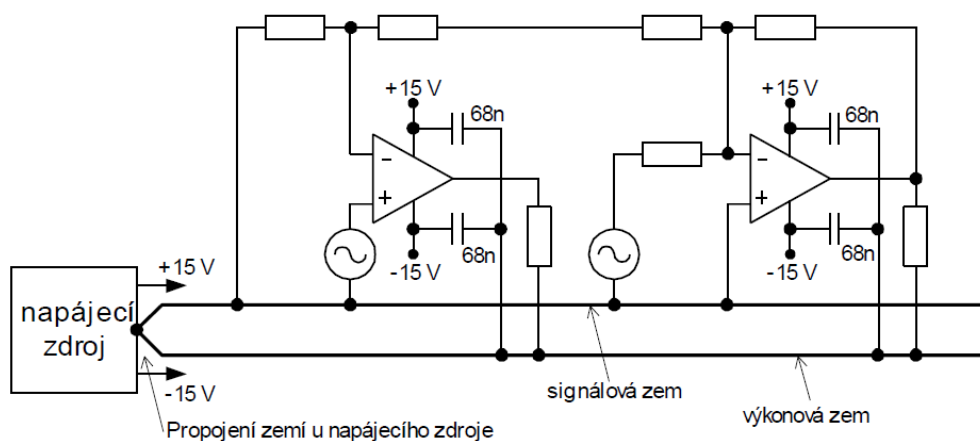
V rozsáhlejších obvodech se využívá paralelní rozvod zemí v obvodu. Proto rozlišujeme několik typů zemí.

- Signálová zem – Připojuje se k obvodům, kterými tečou malé proudy a připojují se k citlivým obvodům.
- Výkonová zem – Připojuje se k obvodům, kterými protékají velké proudy a k výkonovým částem zařízení.

Tyto země je potřeba na jednom místě propojit. Zemní vodiče se nejčastěji propojují

- u vstupní svorky,
- u výstupní svorky,
- u napájecího zdroje.

Na obr. 19 je ukázka zapojení signálové a výkonové země v části obvodu.



Obr. 19 Ukázka zapojení signálové a výkonové země v obvodu [12]

4.4 Oteplení součástek

Při průchodu velmi vysokého proudu součástkami nebo při velkém úbytku napětí na součástkách se začnou zahřívat. Při velkém zahřívání může dojít až ke zničení součástky nebo i celého zařízení, proto je potřeba nadměrnému zahřívání zamezit.

Omezit zahřívání zařízení můžeme několika způsoby:

- Omezením proudu – To znamená, že zmenšíme proud, který prochází součástkou. Můžeme tak učinit například tím, že zapojíme několik součástek stejného typu paralelně k sobě.
- Omezením úbytku napětí – Na výkonových tranzistorech můžeme omezit

úbytek napětí tím, že na transformátoru vytvoříme více sekundárních vinutí, tím zmenšíme maximální úbytek napětí na výkonovém tranzistoru.

- Použitím chladiče – Teplo vytvořené na součástce se odvádí do chladiče, který je pomocí vzduchu ochlazován. Účinnost chladiče můžeme zvětšit použitím větráku připevněného na chladič.
- Použitím všech výše popsaných řešení dohromady.

4.5 Impulsní rušení

Impulsní rušení vzniká při zapnutí relé nebo překlápění logických obvodů, jde vlastně o napěťový skok. Toto rušení se může odstranit pomocí filtrace.

5 VOLBA SOUČÁSTEK

Tato kapitola se zabývá výběrem vhodných součástek pro navrhovaný zdroj. Součástky v této kapitole jsou porovnány s podobnými součástkami od různých výrobců, aby byla vybrána ta nejvhodnější varianta.

5.1 Zdroj referenčního napětí

V tab. 2 je porovnáno několik známých referencí od výrobců Linear Technology, Analog Devices a Texas Instrument. [21] - [28] Výstupní šum je odečten pro kmitočtové pásmo $B=0,1 - 10$ Hz a teplotní drift pro teplotu v rozmezí 0 až 70 °C.

Tab. 2 Srovnání hodnot zdrojů referenčního napětí

Název	Výstupní napětí	Výstupní šum	Teplotní drift	Stabilita	Tolerance výstupního napětí	Cena
	[V]	[μ Vp-p]	[ppm/°C]	[ppm/1kh]	[%]	[Kč]
AD586LQ	5	4	5	15	0,05	517
ADR4550B	5	2,8	2	25	0,02	232
LT1236ACS8-5	5	3	2	20	0,05	220
LT1236AIS8-10	10	6	2	30	0,05	216
LT1021C-5	5	3	2	15	0,05	200
LT1021C-10	10	6	5	15	0,05	200
LT1021B-10	10	6	2	15	0,5	291
LTC6655BHLS8-5	5	1,25	2	20	0,025	398
REF5010	10	30	2,5	100	0,05	182
REF01	10	30	10	50	0,3	78
LM399H	6,95	10 [22]	0,3	8	5,03	275

5.2 Operační zesilovače

V tab. 3 a tab. 4 je uvedeno 10 operačních zesilovačů, které jsou mezi sebou porovnány, podle dostupných hodnot z katalogových listů výrobců daných operačních zesilovačů. Pro porovnání je uveden i běžný OZ TL071, který je použit například v napájecím zdroji Agilent E3634.

Tab. 3 Porovnání operačních zesilovačů část 1

Název		LT1128CN8	AD797B	MAX9632	AD8597
e_n	[nVp-p]	45	50	65	76
u_n	[nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$]	0,9	0,9	0,94	1,07
i_n	[pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$]	1	2	3,75	1,9
U_{CC}	[V]	± 15	± 15	± 15	± 5
A_0	[dB]	140	146	135	116
f_T	[MHz]	20	110	55	10
CMRR	[dB]	126	120	110	135
U_{OS}	[μV]	20	30	30	15
dU_{OS}/dT	[$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]	0,3	0,2	0,15	0,8
I_B	[nA]	40	250	30	40
f_c	[Hz]	3,5	200	90	11
cena	[Kč]	266	278	216	126

Kde e_n je ekvivalentní vstupní šumové napětí pro kmitočtové pásmo $B=0,1$ až 10Hz, u_n je vstupní napěťová hustota šumu pro kmitočet 1kHz, i_n je vstupní proudová hustota šumu pro kmitočet 1kHz, U_{CC} je napájecí napětí, CMRR je činitel potlačení soufázového signálu v rozmezí teplot od -40°C do 125°C , U_{OS} je vstupní napěťová nesymetrie pro hodnotu napájecího napětí uvedenou v tabulkách, dU_{OS}/dT je teplotní kompenzace napěťové nesymetrie pro rozmezí teplot od -40°C do 125°C , I_B je vstupní proud pro rozmezí teplot od -40°C do 125°C .

Tab. 4 Porovnání operačních zesilovačů část 2

Název		OPA211I	LT6018	OPA227P	OP177F	TL071BC
e_n	[nVp-p]	80	30	90	-	-
U_n	[nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$]	1,1	1,2	3	10	18
I_n	[pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$]	1,7	0,8	0,4	3 ₍₁₎	0,01
U_{CC}	[V]	± 15	± 15	± 15	± 15	± 15
A_0	[dB]	130	142	160	135	106
f_T	[MHz]	80	15	8	0,6	3
CMRR	[dB]	120	133	138	140	100
U_{OS}	[μV]	20	7	5	10	2000
dU_{OS}/dT	[$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]	0,15	0,2	0,1	0,3	18
I_B	[nA]	50	60	2,5	1,2	65
f_c	[Hz]	20	300	10	70	500
cena	[Kč]	289	184	106	140	15

(1) Hodnota u OZ OP177F je udána v katalogovém listu výrobce v pA rms pro kmitočtové pásmo $B= 1\text{Hz} - 100\text{Hz}$.

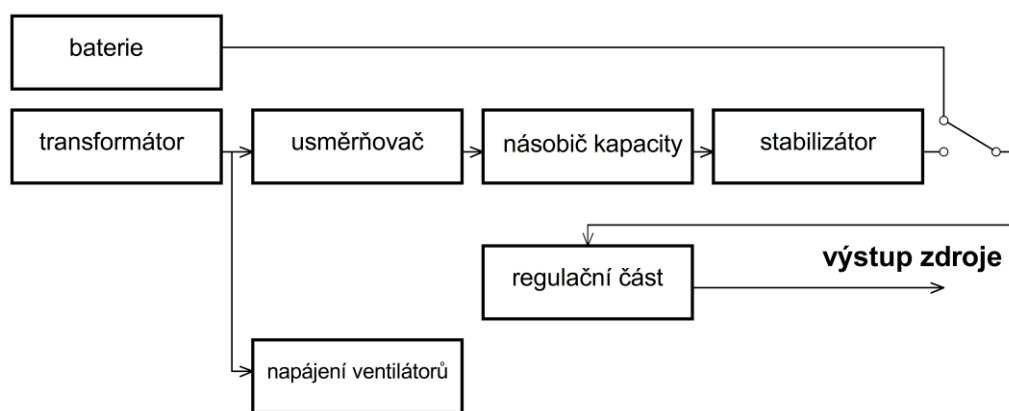
Hodnoty operačních zesilovačů jsou v tabulkách seřazeny podle vstupní napěťové hustoty šumu u_n od nejlepšího OZ po nejhorší. Je tomu tak z důvodu, aby byla vybrána součástka s co nejlepšími šumovými parametry. Nejlepší z vybraných OZ je LT1128CN8, čemuž odpovídá i cena. Nejhuře dopadl TL071, který je běžně používaný OZ a byl vybrán pro porovnání parametrů s ostatními operačními zesilovači. Je vidět, že mezi prvním a posledním operačním zesilovačem je znatelný rozdíl v parametrech i v ceně. Ceny jsou uvedeny bez DPH ke dni 21.5 2017 a jsou z velké většiny použity z obchodů <http://cz.farnell.com/> nebo <http://www.tme.eu/cz/>.

6 NÁVRH NAPÁJECÍHO ZDROJE

V této kapitole bude postupně představen návrh celého napájecího zdroje. Navrhovaný zdroj bude moci být používán pro metody měření NQR i NMR. Zdroj je lineární.

Vyráběný zdroj bude regulovatelný, tedy si na něm může obsluha nastavit příslušné napájecí napětí od 0 V, až do 50 V. Proud bude nastavitelný od 0 A do 7 A. Výstupní hodnoty budou zobrazeny na čelním panelu. Proud i výstupní napětí budou zobrazeny na analogovém ukazateli.

Zdroj bude chlazen pomocí chladiče s ventilátorem umístěným na zadní straně zdroje. Na obr. 20 je blokové schéma navrhovaného zdroje.



Obr. 20 Blokové schéma zdroje

Zdroj bude mít dvě možnosti napájení. Může být napájen přes transformátor ze síťového napětí nebo z baterií. Uživatel si bude moci vybrat pomocí přepínače na čelní straně zdroje způsob napájení. Pro síťové napájení se v obvodu bude za transformátorem nacházet usměrňovač, za usměrňovačem se bude v obvodu nacházet násobič kapacity, stabilizátor a regulační část obvodu. Regulační část se skládá z referenčního zdroje, akčního členu, porovnávacího obvodu a měřícího členu. Tyto obvody jsou popsány v následujících kapitolách.

Transformátor bude mít více odboček sekundárního vinutí. Tyto vinutí budou připojeny jednak k regulační části zdroje, ale také i k napájení další důležitých zařízení uvnitř samotného zdroje jako je například napájení ventilátorů na chladiči. Témata - návrh transformátoru a návrh chlazení jsou popsány v samostatných kapitolách.

6.1 Požadované parametry

Vyráběný zdroj má zadané určité parametry, které musí být splněny. V tomto projektu již byly několikrát zmíněny. Zde jsou všechny přehledně shrnuty. Jedná se o výstupní napětí, proud a šumové vlastnosti zdroje. Pro porovnání maximální šum zdroje Agilent E3634 50 V/4 A je $3 \text{ mV}_{\text{p-p}}$ pro pásmo 20 Hz až 20 MHz, zdroje TESLA BS525 30 V/1 A $500 \text{ }\mu\text{V}_{\text{p-p}}$, pro dosud používaný zdroj Mesit MN 40V 10A je 1 mV_{ef} , ale vadí u něj impulsní rušení od tyristorové předregulace.

Požadované parametry zdroje

- Výstupní napětí 0 – 50 V
- Výstupní proud 0 – 7 A
- Maximální šum $350\mu V_{p-p}$,

6.2 Mechanická konstrukce

Celé navržené zařízení bude vloženo do kovové přístrojové skříně využitě z přístroje 12xn084. Její rozměry jsou uvedeny v tab. 5. Podle rozměrů přístrojové skříně byl dále vybrán chladič, který bude umístěn na zadní straně. Na obr. 21 je fotografie použité přístrojové skříně.

Tab. 5 Rozměry přístrojové skříně

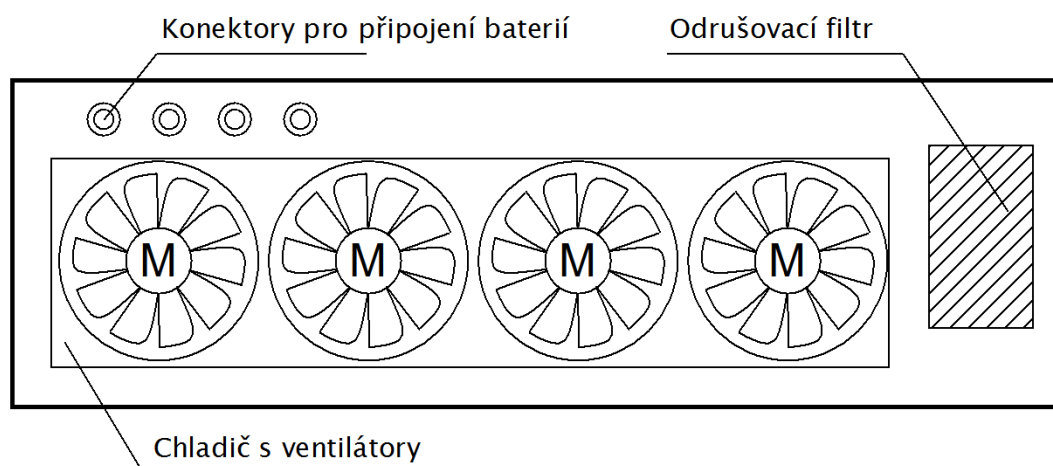
Délka	43,6 cm
Výška	13 cm
Šířka	38,5 cm



Obr. 21 Přístrojová skříň

6.2.1 Zadní strana přístrojové skříně

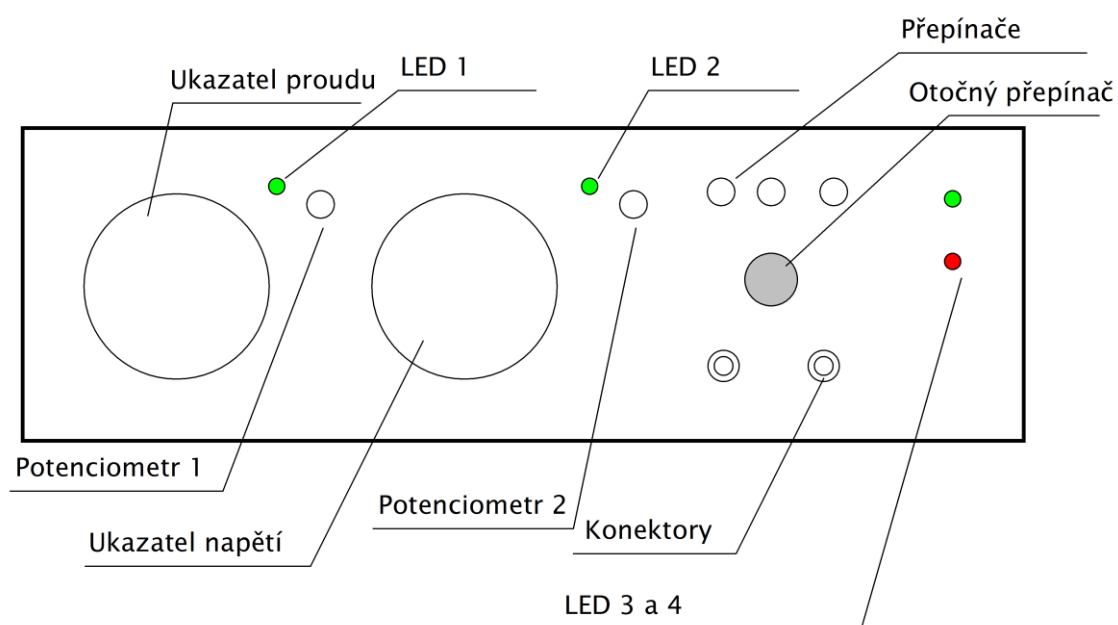
Na zadní straně přístrojové skříně bude umístěn chladič s ventilátory, odrušovací filtr se síťovým spínačem a konektorem pro připojení síťového kabelu a konektory pro připojení napájení z externích baterií. Návrh a rozložení konektorů na zadní straně zdrojové skříně je na obr. 22.



Obr. 22 Návrh zadní strany zdroje

6.2.2 Čelní strana přístrojové skříně

Na čelní straně přístroje budou umístěny dva analogové panelové ukazatele proudu a napětí. U každého ukazatele bude jedna LED dioda, která signalizuje svým zapnutím, jestli je zdroj v režimu konstantního proudu nebo napětí. Potenciometry slouží k nastavování výstupních hodnot. V pravém horním rohu se nacházejí tři přepínače, které slouží k přepínání napájení. Zdroj má možnost přepnout mezi síťovým napájením a napájením z baterie. Zelená LED 3 slouží k indikaci připojeného síťového napájení a červená LED 4 se rozsvítí, pokud by na chladiči byla teplota přesahující 70 °C. Tato dioda slouží jako tepelná ochrana. V pravé dolní části se nacházejí výstupní konektory. Mezi výstupními konektory a přepínači se nachází otočný přepínač, pomocí kterého lze navolit rozsah výstupního napětí. Ukázka čelní strany zdroje je na obr. 23.



Obr. 23 Návrh čelní strany zdroje

6.3 Návrh chlazení

Chladič je velmi důležité zařízení, které zajišťuje správný chod celého zdroje. Bez chladiče by se přehřály výkonové tranzistory. Chladič, který bude použit, byl vybrán vzhledem k velikosti přístrojové skříně a k jeho co nejlepším vlastnostem.

Vybraný chladič je CHL45V4-12, který se svými rozměry může připevnit na zadní stěnu přístrojové skříně. Jedná se o chladič s osazenými 4 ventilátory, které snižují jeho tepelný odpor. Se zapnutými ventilátory se dostane tepelný odpor chladiče na hodnotu $R_{thcl} = 0,18 \text{ K/W}$. Jeho napájecí napětí je 12V.

K tomuto chladiči jsou od výrobce doporučeny dva termostaty. První termostat slouží k zapnutí ventilátoru, pokud teplota překročí určitou hranici. Druhý termostat slouží jako tepelná pojistka a při zvýšení teploty nad určitou mez odpojí zařízení od napájecího napětí.

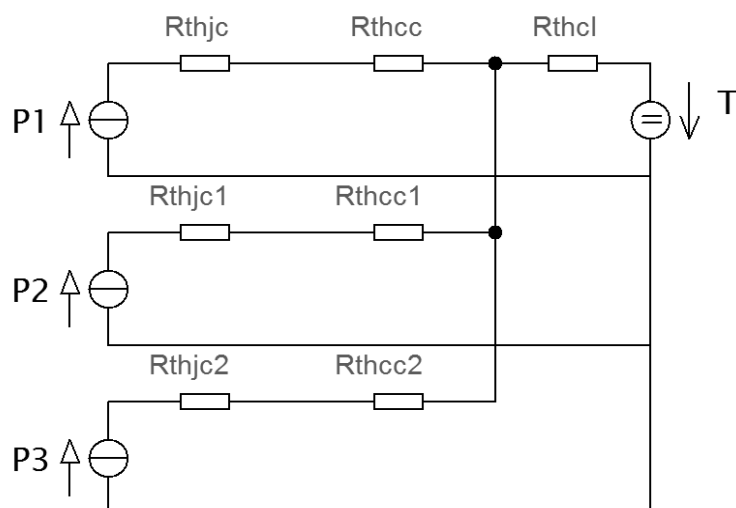
Pro navrhovaný zdroj byl vybrán jako výkonový tranzistor, bipolární tranzistor MJL21196, který má tepelný odpor $R_{thjc} = 0,7 \text{ K/W}$.

V kapitole 4.4 jsou popsány způsoby chlazení součástky. V návrhu zdroje budou použity všechny tři způsoby. To znamená, že bude snížen proud, který bude procházet chlazeným tranzistorem a to tím způsobem, že bude zapojeno více tranzistorů paralelně. Za druhé bude použit transformátor s více odbočkami, tedy s více sekundárními vinutími. Tento způsob zmenší úbytek napětí na obvodu při snižování výstupního napětí a za třetí bude použit chladič, který je popsán na začátku této kapitoly. V tab. 6 jsou popsány jednotlivé tepelné odpory chladičí soustavy.

Tab. 6 Přehled tepelných odporů

Tepelný odpor	Hodnota [K/W]
R_{thjc}	0,7
R_{thcc}	0,15
R_{thcl}	0,18

Na obr. 24 je znázorněna chladičí soustava, kde R_{thjc} je tepelný odpor od polovodičového přechodu součástky na tělo součástky, R_{thcc} je odpor přechodu mezi pouzdrem a tepelnou podložkou a mezi tepelnou podložkou a chladičem a R_{thcl} je tepelný odpor samotného chladiče. Na obrázku níže je schéma chladičí soustavy při zanedbání tepelného odporu pouzdra součástky a při třech tranzistorech zapojených paralelně.



Obr. 24 Chladicí soustava pro 3 tranzistory paralelně

6.3.1 Teoretický návrh chlazení zdroje

Tato podkapitola popisuje návrh chlazení zdroje, podle kterého se navrhl transformátor pro zdroj a další důležité části, které mají s chlazením zdroje spojitost. Z nabízených a vypočítaných variant se také vybrala ta nejvhodnější a podle ní se dále postupovalo v návrhu zdroje. Hodnoty popisované v této kapitole jsou počítány pro vstupní napětí 230 V

V tabulkách níže jsou zaneseny maximální teploty chladiče a součástky při použití více obvodů zapojených paralelně a při použití transformátoru s více odbočkami. Každá jednotlivá tabulka ukazuje jednu variantu transformátoru. Napětí v tabulkách uvažuje odbočky transformátoru po 5V (10 odboček), 10V (5 odboček), 12,5 (4 odbočky), 16,6V (3 odbočky) a po 25V (2 odbočky). Výpočet hodnot byl proveden v programu Pspice. U celého výpočtu se uvažuje minimální úbytek 5 V na regulačním tranzistoru a 3 V na násobiči kapacity. Pro účely simulace se uvažovalo s teplotou 40°C, která je uvnitř přístrojové skříně.

Tab. 7 Teploty chladiče tranzistoru pro 10 odboček sekundárního vinutí.

Počet tranzistorů	1	2	3	4
Teplota chladiče	56°C	56°C	56°C	56°C
Teplota tranzistoru	133°C	95°C	82°C	76°C

Tab. 8 Teploty chladiče tranzistoru pro 5 odboček sekundárního vinutí.

Počet tranzistorů	1	2	3	4
Teplota chladiče	63°C	63°C	63°C	63°C
Teplota tranzistoru	169°C	116°C	98°C	90°C

Tab. 9 Teploty chladiče tranzistoru pro 4 odbočky sekundárního vinutí.

Počet tranzistorů	1	2	3	4
Teplota chladiče	66°C	66°C	66°C	66°C
Teplota tranzistoru	187°C	127°C	106°C	96°C

Tab. 10 Teploty chladiče tranzistoru pro 3 odbočky sekundárního vinutí.

Počet tranzistorů	1	2	3	4
Teplota chladiče	71°C	71°C	71°C	71°C
Teplota tranzistoru	217°C	144°C	120°C	108°C

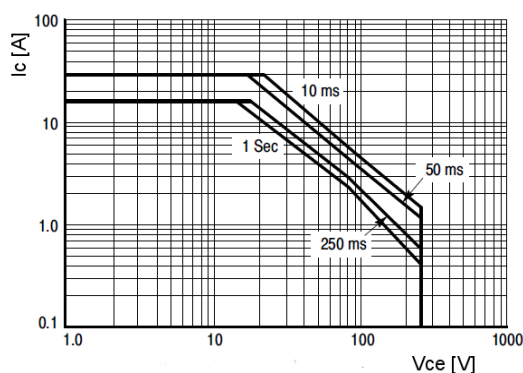
Tab. 11 Teploty chladiče tranzistoru pro 2 odbočky sekundárního vinutí.

Počet tranzistorů	1	2	3	4
Teplota chladiče	82°C	82°C	82°C	82°C
Teplota tranzistoru	278°C	180°C	147°C	131°C

Tranzistor MJL21196 má provozní teplotu podle katalogového listu výrobce stanovenou v rozmezí -65 až 150 °C. Pro maximální výstupní proud udává výrobce graf, který je zobrazen na obr. 25, kde je zadán maximální proud při určitém napětí V_{CE} , tedy napětí mezi kolektorem a emitorem. Maximální proud, který by procházel jedním tranzistorem, při zapojení jednoho nebo více tranzistorů paralelně, je zaznamenán v tab. 12.

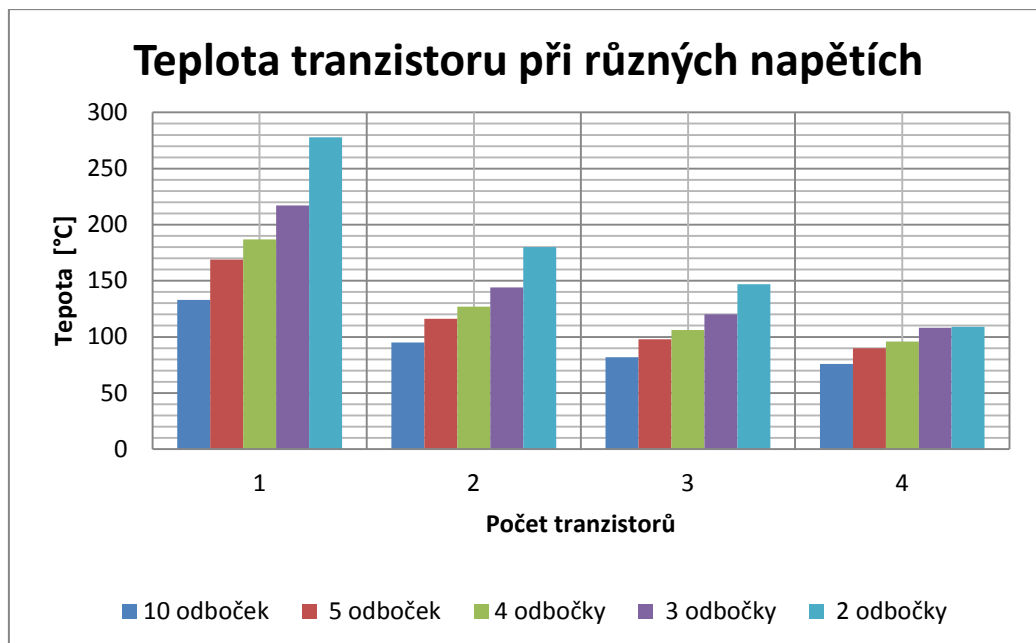
Tab. 12 Maximální proudy procházející tranzistorem MJL21196 při paralelním zapojení.

Počet tranzistorů	1	2	3	4
Maximální proud	7,00A	3,50A	2,33A	1,75A



Obr. 25 Znárodnění maximálního proudu při určitých napětích na tranzistoru MJL21196 [36]

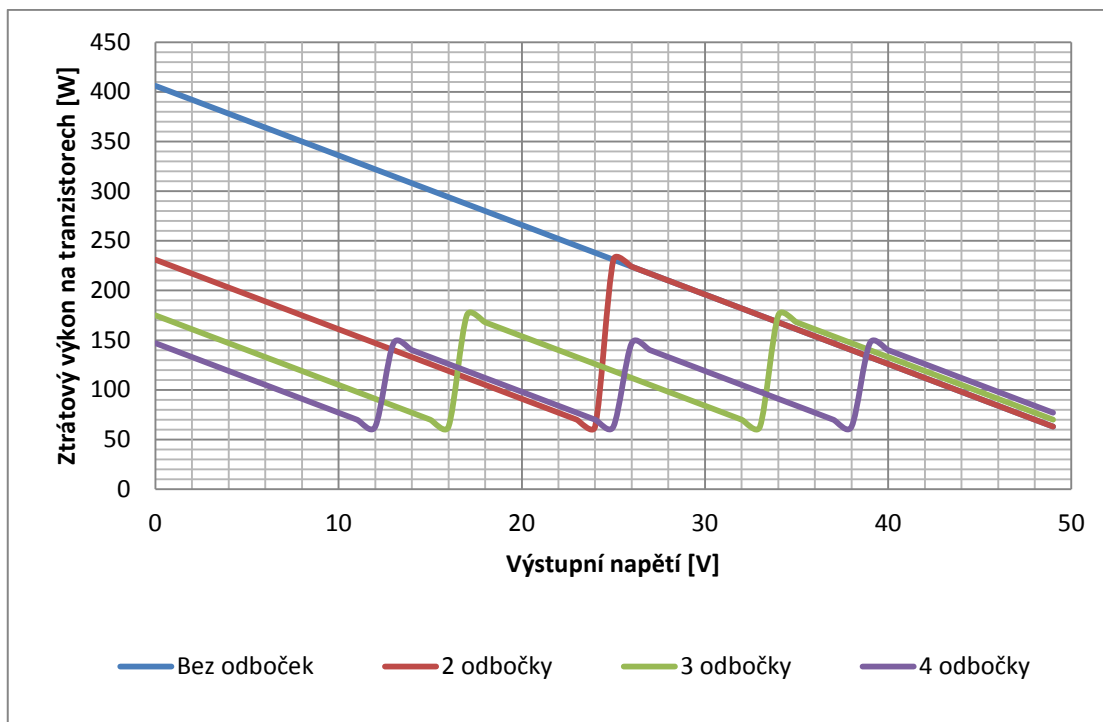
Na obr. 26 je znázorněna závislost teploty tranzistoru na jeho maximálních úbytcích napětí. Z grafu lze vyčíst, že na teplotu tranzistoru má vliv jak přiložené napětí, tak i počet tranzistorů zapojených paralelně.



Obr. 26 Graf závislosti teploty tranzistoru na počtu odboček

Na obr. 27 je znázorněn graf, který zobrazuje výkon na výkonových tranzistorech MJL211196 při zvětšování výstupního napětí. Z grafu je patrné, že při zapojení s jedním sekundárním vinutím transformátoru, tedy bez odbočky, vznikají na tranzistoru největší úbytky napětí, a proto i největší ztrátový výkon. Při zapojení s více sekundárními vinutími, a tedy více odbočkami, se maximální ztrátový výkon zmenšuje. Zmenšuje se tedy i jeho zahřívání. Čím více odboček je do obvodu zařazeno, tím menší je ztrátový výkon na tranzistoru.

Funkce odboček je následující. Při nulovém výstupním napětí je na tranzistoru maximální úbytek napětí. Při zapojení bez odboček je to 50V se dvěma odbočkami 25V, se třemi 16,6V a se čtyřmi odbočkami je maximální úbytek napětí na tranzistoru 12,5V. Například, když se použijí 4 odbočky, bude se vstupní napětí měnit po 12,5V, aby byl dodržen maximální úbytek napětí na tranzistoru. Vstupní napětí bude nabývat hodnot 12,5V, 25V, 37,5V a 50V. Vstupní napětí se bude měnit v závislosti na nastavení výstupního napětí pomocí potenciometru na čelní straně zdroje. Pro výpočet výkonu na tranzistoru byl použit maximální výstupní proud 7A.



Obr. 27 Srovnání výkonu na výkonových tranzistorech

6.3.2 Chlazení zdroje podle vybrané varianty

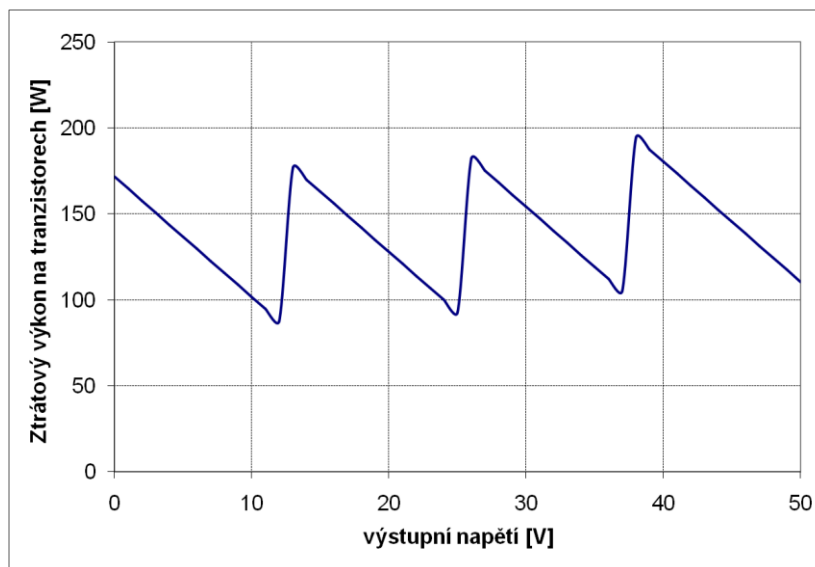
V předchozí podkapitole bylo popsáno několik nabízených variant chlazení zdroje. Byly zde posuzovány parametry chlazení zdroje pro několik výkonových tranzistorů paralelně i varianty pro několik odboček a transformátoru. Z nabízených variant nejlépe vyhovuje varianta, kdy budeme mít 4 tranzistory zapojeny paralelně, a transformátor bude mít 4 odbočky vinutí. To znamená, že budou na transformátoru odbočky na vinutí po 12,5 V. Protože nenavrhujeme zdroj jen na vstupní napětí 230 V, ale na napětí 230 V \pm 10 %, musí se vypočtené hodnoty ještě upravit a zpřesnit. Výstupní sekundární napětí bude o 10 % vyšší, aby zdroj pracoval i při sníženém napětí sítě 207 V.

V tab. 13 je zapsána maximální teplota, která by měla vzniknout na chladiči a na jednom tranzistoru při plném zatížení zdroje a při vstupním síťovém napětí 253 V pro upravené sekundární napětí.

Tab. 13 Maximální teploty na chladiči a na tranzistoru při napětí 253 V

	Na chladiči	Na tranzistoru
Teplota	76°C	119°C

Na obr. 28 je zobrazen graf, který zobrazuje ztrátový výkon na 4 výkonových tranzistorech zapojených paralelně pro síťové napětí 253 V. V grafu je patrné připínání mezi odbočkami transformátoru po 12,5 V. Ztrátový výkon na tranzistorech je počítán pro výstupní proud 7 A. Pro snížení teploty tranzistorového pouzdra byla použita kvalitní kaptonová teplovodná podložka s tepelným odporem 0,15 K/W.



Obr. 28 Grafické zobrazení ztrátového výkonu v závislosti na výstupním napětí

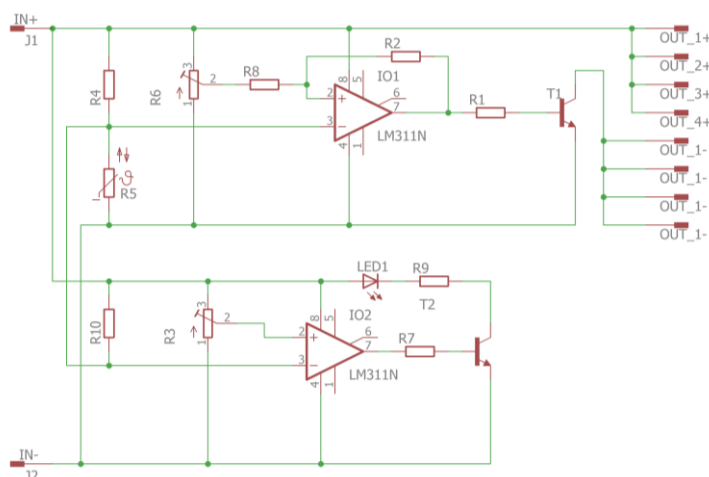
6.4 Návrh ovládání ventilátorů

K ovládání ventilátorů slouží samostatná DPS. Obvod na desce zapíná ventilátory při zvyšující se teplotě na chladiči. Obvod obsahuje komparátor s hysterezí, který při zvýšení teploty nad 30°C na chladiči, zapne ventilátory. Je to z důvodu, aby ventilátory nemusely být zapnuté a ochlazovat chladič i v případě, kdy to není potřeba.

Pro snímání teploty na chladiči slouží termistor NTC, u kterého při zvyšování teploty klesá odpor. Pro nastavení teploty snímání slouží trimr. Komparátor pak porovnává napětí na nastavovacím trimru a termistoru. Podle nastavení trimru a naměřené teploty, pak zapíná nebo vypíná všechny 4 ventilátory namontované na chladiči.

Součástí této desky je i obvod, který slouží jako ochrana před nežádoucí vysokou teplotou na chladiči. V obvodu je komparátor, který sleduje teplotu na chladiči a pokud tato teplota stoupne nad 70 °C, tak se na čelním panelu rozsvítí červená výstražná LED dioda. Tato dioda slouží jako ochrana a obsluha by měla zařízení vypnout a nechat ochladit, aby nedošlo k poškození zdroje.

Schéma zapojení je na obr. 29, kde horní část zapojení slouží ke spínání všech čtyř ventilátorů a dolní část zapojení obvodu slouží jako ochrana před nežádoucí vysokou teplotou na chladiči a spíná červenou LED. Pro funkci komparátorů je použit obvod LM311.



Obr. 29 Schéma zapojení pro ovládání ventilátorů

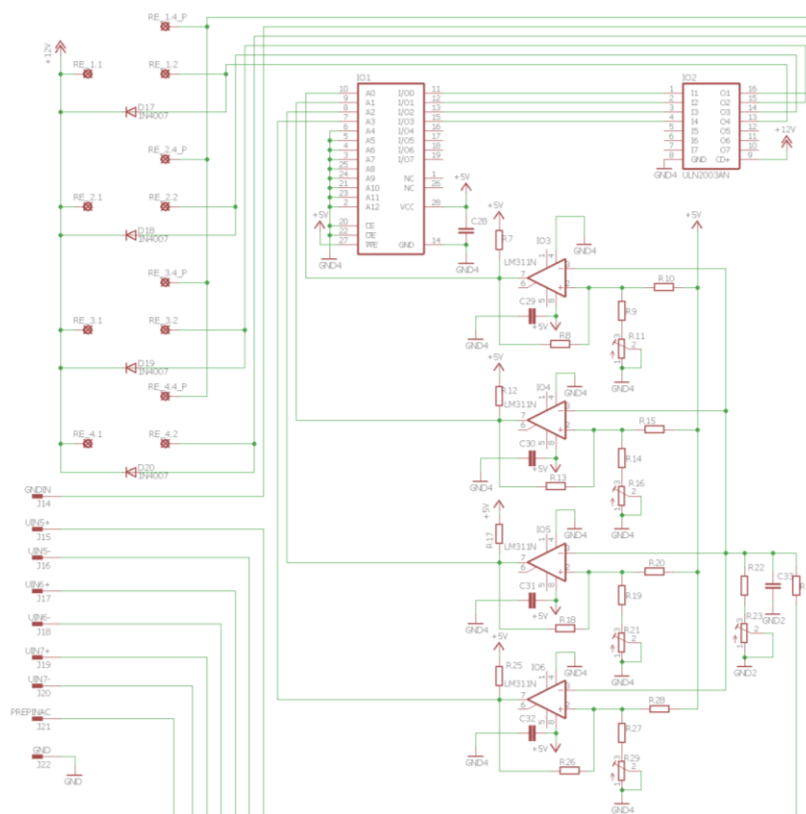
6.5 Návrh přepínání mezi odbočkami transformátoru

Z důvodu uchlazení zdroje byla v předchozích kapitolách vybrána varianta přepínání odboček vinutí na transformátoru. Konkrétně se bude přepínat mezi 4 odbočkami. Přepínat mezi odbočkami se bude pomocí 4 relé HE1AN12DC. Tyto relé budou ovládány pomocí paměti EEPROM 28C64C. Obsah paměti je v tab. 14, kde v levé části tabulky jsou vstupní hodnoty a v pravé části výstupní hodnoty. Vstupními hodnotami budou pro paměť výstupy komparátorů, kde +5 V na výstupu komparátoru znamená log. 1 a naopak 0 V znamená log. 0. Pomocí výstupních log. 1 a log. 0 jsou spínány tranzistory, které spínají relé. Řádky v tabulce níže, ve kterých jsou zapsány X jsou varianty, které by neměly nikdy nastat. Tyto varianty vstupních hodnot by se při normálním provozu zdroje neměly na vstupech paměti nikdy objevit. Všechny tranzistory, které spínají relé, jsou osazeny v jednom obvodu ULN2003AN.

Tab. 14 Obsah paměti 28C64C

Vstupní hodnoty			Výstupní hodnoty			
A1	A2	A3	I/O0	I/O1	I/O2	I/O3
0	0	0	0	0	0	1
0	0	1	X	X	X	X
0	1	0	0	0	1	0
0	1	1	X	X	X	X
1	0	0	X	X	X	X
1	0	1	X	X	X	X
1	1	0	0	1	0	0
1	1	1	1	0	0	0

Na obr. 30 je zobrazena část obvodu zdrojové desky, která se stará a spínání relé. IO1 představuje paměť EEPROM, IO2 je obvod ULN2003AN obsahující tranzistory, které spínají jednotlivá relé a IO3 až IO5 představují komparátory, které slouží k ovládání a přepínání relé. Na neinvertující vstupy komparátorů je připojeno referenční napětí 5 V a na invertující vstupy je připojeno výstupní napětí zdroje, které je pomocí odporového děliče 10 krát zmenšeno. Při výstupním napětí zdroje 50 V bude, tedy na vstupy komparátorů přivedeno 5 V. Komparátory jsou v zapojení s hysterezí, která je přibližně 2,5 V.



Obr. 30 schéma zapojení obvodu pro ovládání relé

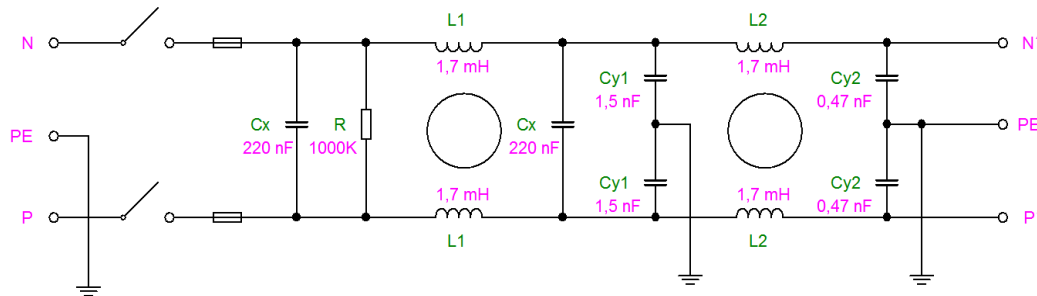
V tab. 15 jsou zapsány vypočtené parametry komparátorů při počítání s reálnými hodnotami rezistorů z řady E12. V první sloupečku je vidět napětí, při kterém sepne komparátor při zvyšování výstupního napětí zdroje. V druhém sloupci je naopak hodnota, kdy sepne komparátor, při snižování výstupního napětí zdroje.

Tab. 15 Parametry komparátorů

	Zvyšování napětí [V]	Snižování napětí [V]	Hystereze [V]
IO3	12,53	10,03	2,49
IO4	24,99	22,45	2,54
IO5	37,44	34,68	2,76

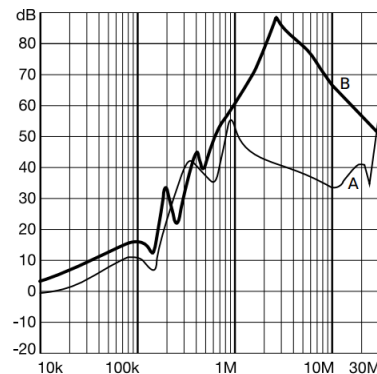
6.6 Odrušovací filtr

Z požadavků v předchozích kapitolách vyplývá nutnost potlačení rušení od sítě v kmitočtovém pásmu 1 MHz až 30 MHz. Další potlačení rušení provede elektrostatische stínění transformátoru. Byl vybrán kvalitní odrušovací filtr FN9290-4-06. Jeho útlumová charakteristika je na obr. 32. Křivka A je pro symetrické rušení a křivka B pro asymetrické rušení. Na obr. 31 je zobrazeno vnitřní zapojení vybraného odrušovacího filtru FN9290-4-06 i s použitými hodnotami součástek.



Obr. 31 Vnitřní zapojení odrušovacího filtru FN9290-4-06 [37]

4 – 6A types



Obr. 32 útlumová charakteristika filtru SCHAFFNER FN9290-4-06 vlevo a jeho provedení vpravo [37]

6.7 Transformátor

V této kapitole bude popsán návrh transformátoru pro nízkošumový zdroj. Transformátor bude mít jedno primární vinutí připojené na síťové napětí 230V a 7 sekundárních vinutí. Z toho čtyři sekundární vinutí, která budou mít odstup napětí 12,5V, jedno vinutí pro napájení ventilátorů na chladiči a pro napájení přepínání relé a dvě vinutí pro napájení operačních zesilovačů.

6.7.1 Teoretický návrh transformátoru

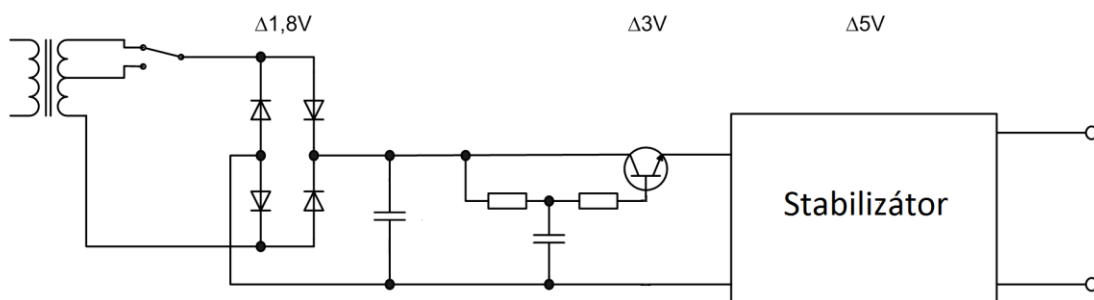
Hodnoty požadovaných výstupních napětí jsou uvedeny v tab. 16.

Tab. 16 Hodnoty požadovaných stejnosměrných výstupních napětí

Název vinutí	Napětí $U_{\text{výst}} [\text{V}]$
U_1	12,5
U_2	25,0
U_3	37,5
U_4	50,0
U_5	12,0
U_6	12,0
U_7	12,0

Maximální proud prvními čtyřmi vinutími $I_{\text{AV}} = 7 \text{ A}$ a zvlnění napětí na filtračním kondenzátoru je požadováno pod 2 %. Pomocí nomogramu můžeme vypočítat skutečná napětí na sekundárních vinutích a také velikost sběracího kondenzátoru. Nomogram je znázorněn na obr. 34. Vnitřní odpor vinutí odhadneme na $R_s = 0,3 \Omega$. Pro každé vinutí je potřeba vypočítat jeho skutečné napětí na vinutí.

Při výpočtech je také potřeba počítat s úbytkem napětí na součástkách a započítat ho při výpočtech. Na obr. 33 je ukázka zapojení napájecí části nízkošumového zdroje s vyznačenými úbytky napětí na jednotlivých součástkách a částech obvodu. Úbytek napětí vzniká na usměrňovacích diodách, násobiči kapacity a také na stabilizátoru napětí. Výsledný úbytek napětí je pouze teoretický. Skutečná hodnota úbytku napětí bude zjištěna po výběru konkrétních součástek.

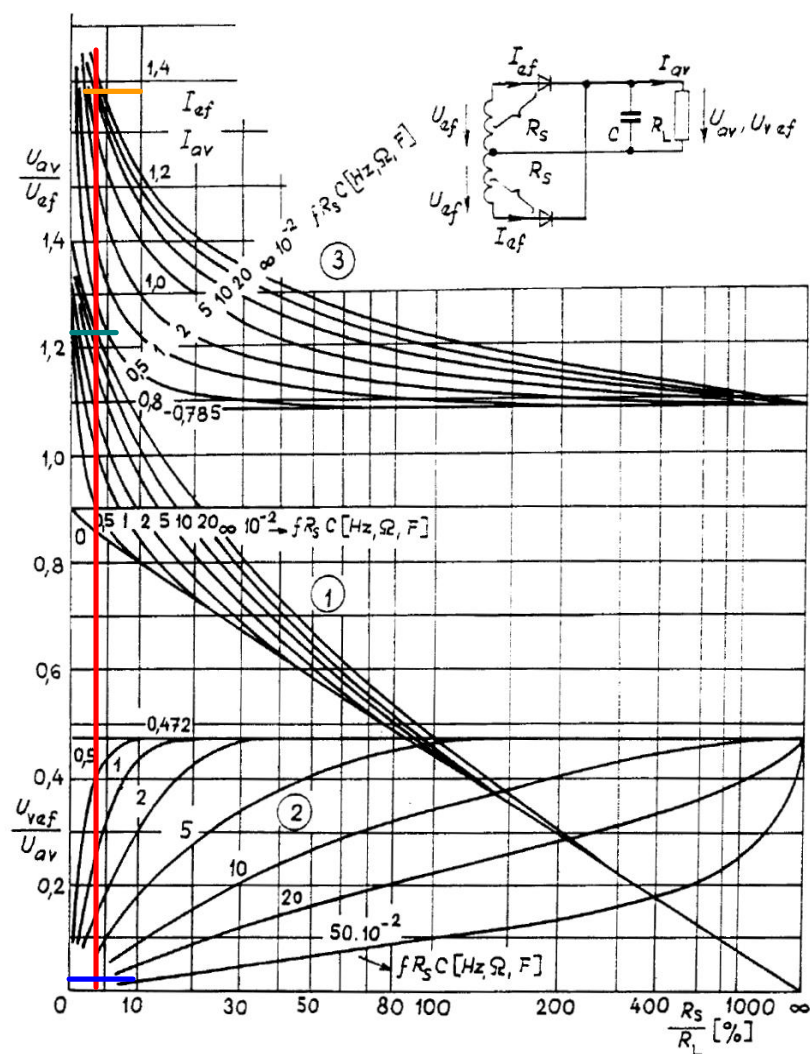


Obr. 33 Zapojení napájecí části regulovaného zdroje

Je potřeba s tímto úbytkem napětí uvažovat a přičíst ho k hodnotám napětí U_{AV} . Hodnoty s připočteným úbytkem napětí jsou zobrazeny v tab. 17 pod názvem U_{AV2} .

Tab. 17 Hodnoty výstupních napětí s připočteným úbytkem napětí

Název vinutí	Napětí U_{AV2} [V]
U_1	22,3
U_2	34,8
U_3	47,3
U_4	59,8
U_5	18,2
U_6	18,2
U_7	18,2



Obr. 34 Nomogram pro dvoucestný usměrňovač s RC zátěží se zakresleným výpočtem [39]

Pro vinutí U_4 by výpočet hodnot vypadal následovně. Zatěžovací odpor R_L se vypočítá jako podíl námi požadovaného výstupního napětí U_{AV2} a proudu I_{AV} . Protože

na stabilizátoru, na násobiči kapacity a na usměrňovacích diodách dochází k úbytku napětí, musí se výstupní napětí navýšit o tento úbytek.

$$R_L = \frac{U_{AV2}}{I_{AV}} = \frac{59,8}{7} = 8,54 \, \Omega \quad (6.1)$$

Veličina, kterou odečítáme na horizontální ose nomogramu, je poměr vnitřního odporu vinutí transformátoru R_S a zatěžovacího odporu R_L . K odporu vinutí transformátoru připočteme dva dynamické odpory diody $50 \, m\Omega$.

$$\frac{R_S}{R_L} \cdot 100 = \frac{0,3}{8,54} \cdot 100 = 3,51\% \quad (6.2)$$

Ze zadaného zvlnění výstupního napětí v procentech vypočteme zvlnění ve voltech.

$$U_{Vef} = \frac{P}{100} \cdot U_{AV2} = \frac{2}{100} \cdot 59,8 = 1,196 \, V \quad (6.3)$$

Dále vypočítáme hodnotu sběracího kondenzátoru. Pro tento výpočet musíme odečíst z nomogramu hodnotu $f \cdot R_S \cdot C$, pro zvolené zvlnění.

$$f \cdot R_S \cdot C = 20 \cdot 10^{-2} \quad (6.4)$$

Po úpravě rovnice 6.4 dostáváme rovnici 6.5, z které nám vyjde požadovaná hodnota sběracího kondenzátoru.

$$C = \frac{20 \cdot 10^{-2}}{f \cdot R_S} = \frac{20 \cdot 10^{-2}}{50 \cdot 0,2} = 0,02F = 20 \, mF \quad (6.5)$$

Napětí na sekundárním vinutí U_{ef} se určí z poměru napětí U_{AV} a U_{ef} , který odečteme z nomogramu. Pro námi vypočítaný kondenzátor vychází tento poměr roven 1,22. Z této hodnoty se vypočte napětí na sekundárním vinutí.

$$U_{ef} = \frac{U_{AV2}}{1,22} = \frac{59,8}{1,22} = 49,02 \, V \quad (6.6)$$

Pro výpočet proudu I_{ef} je potřeba z nomogramu odečíst hodnotu pro poměr I_{ef} ku I_{AV} . Následně musíme z této hodnoty vypočítat výslednou hodnotu I_{ef} , která se musí u Graetzova můstku vynásobit $\sqrt{2}$.

$$I_{ef} = \sqrt{2} \cdot I_{AV} \cdot 1,38 = \sqrt{2} \cdot 7 \cdot 1,38 = 13,66 \, A \quad (6.7)$$

Výslednou hodnotu napětí je potřeba ještě zvýšit o 10%, abychom počítali s určitou rezervou při poklesu vstupního napětí. Dodavatelé elektrické energie garantují, že napájecí napětí se bude pohybovat v rozmezí 207 až 253 V, tedy se napětí může lišit o 10 %.

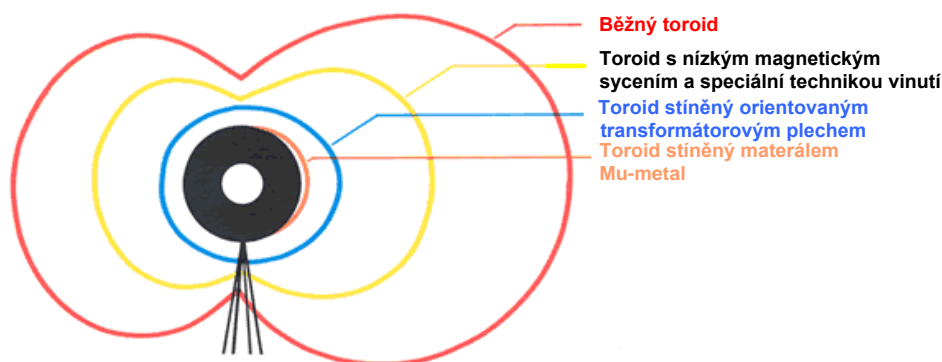
$$U_{2ef} = U_{ef} \cdot 1,1 = 53,92V \quad (6.8)$$

Výpočet hodnot u dalších vinutí bude velmi podobný, proto zde nejsou jejich výpočty uvedeny. V tab. 18 jsou zobrazeny jejich výsledné hodnoty pro všechny další sekundární vinutí.

Tab. 18 Vypočtené hodnoty napětí a proudů na sekundárních vinutích

Název	$U_{\text{výst}}$ [V]	I_{AV} [A]	$U_{2\text{ef}}$ [V]	I_{ef} [A]
U_1	12,5	7	20,11	13,66
U_2	25,0	7	31,38	13,66
U_3	37,5	7	42,65	13,66
U_4	50,0	7	53,92	13,66
U_5	12,0	1	16,41	1,95
U_6	12,0	0,5	16,41	1,95
U_7	12,0	0,5	16,41	1,95

Pro navržené hodnoty napětí a proudů je třeba zvolit vhodnou konstrukci transformátoru. Z literatury vyplývá výhodné použití toroidních transformátorů oproti transformátorům EI u výkonů nad 100 VA, což je případ našeho transformátoru. Je to z důvodu vyšší účinnosti toroidního transformátoru, menšího magnetizačního proudu a také nižší akustické hlučnosti při provozu. Firma NT magnetic s.r.o udává poměr magnetického rušení mezi EI transformátorem a obdobným toroidním transformátorem 8:1. Výrobce Talema je konkrétnější a udává poměrné rozptylové pole toroidního transformátoru pro různé konfigurace návrhu.



Obr. 35 Úroveň magnetického rušení pro různé návrhy toroidního transformátoru

Výhodné je použít nižší sycení transformátoru (u orientovaných plechů M089-27 pouze 1,4 T) a navíc použít magnetické stínění po obvodu transformátoru z kvalitní křemíkové oceli. Transformátor byl vyroben u firmy BV elektronik, která umožňuje výrobu transformátoru plně podle přání zákazníka a UTEE s ní má dobré zkušenosti.

6.8 Regulace a zobrazení výstupních hodnot

Pro nastavení správných výstupních veličin je potřeba tyto hodnoty z obvodu odečíst a zobrazit k nahlédnutí pro obsluhu přístroje. Zobrazování výstupních veličin je popsáno v následující kapitole. Tato kapitola je zaměřena na způsob zobrazení hodnot výstupního napětí a proudu z obvodu.

6.8.1 Regulace a zobrazení výstupního napětí

Výstupní napětí je pro obsluhu zdroje zobrazeno na čelním panelu pomocí panelového analogového ukazatele. Vedle ukazatele je zelená dioda, která indikuje, že se zdroj nachází v režimu konstantního napětí. Zdroj se může nacházet v režimu konstantního proudu nebo konstantního napětí. Výstupní napětí lze regulovat pomocí potenciometru, který se nachází vedle ukazatele napětí. Tento potenciometr slouží k jemnému doladění výstupního napětí nebo hrubému ladění výstupního napětí. K výběru mezi jemným laděním a hrubým laděním slouží otočný spínač do panelu s 2 krát 6 kontakty. Pomocí tohoto spínače může obsluha navolit rozsah po 10 V a pak potenciometrem jemně doladit nebo může zvolit režim hrubé regulace a nastavit napětí jen pomocí potenciometru bez volby rozsahu.

6.8.2 Regulace a zobrazení výstupního proudu

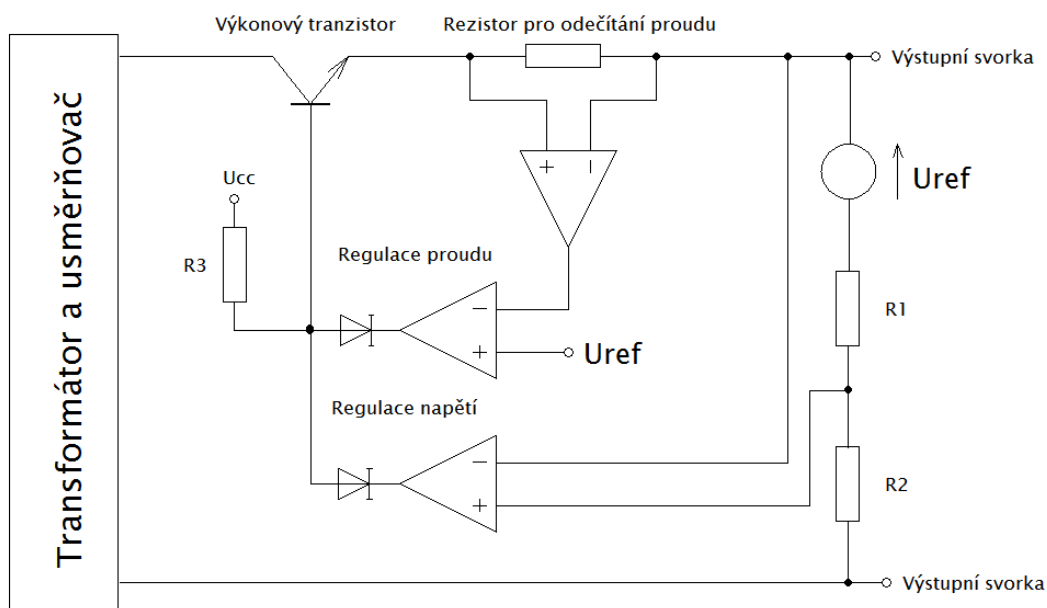
Regulace výstupního proudu v režimu konstantního proudu je možná pomocí potenciometru, který se nachází na předním panelu zdroje. K indikaci režimu konstantního proudu slouží zelená dioda, která se nachází vedle potenciometru. Výstupní proud lze odečíst na analogovém panelovém ukazateli na předním panelu.

6.9 Regulační část zdroje

V předchozích kapitolách je popsán návrh transformátoru, usměrňovače a násobiče kapacity. Tato kapitola popisuje návrh regulační části zdroje, která je zapojena za tyto obvody. Při návrhu koncepce byla brána inspirace ze zapojení zdrojů Agilent E3634, Tesla BS525 a návrhu digitálně řízeného zdroje Františka Pospíšila, kde se ale vyskytují některé chyby v popisech jednotlivých řídicích bloků. Základním problémem celkové koncepce je požadavek na relativně vysokou hodnotu regulovaného napětí (0-50 V). OZ na vyšší napájecí napětí, která by bylo možné použít, mají horší šumové vlastnosti. Proto byly použity nízkošumové OZ vybrané v předcházejících kapitolách a využito zapojení použité ve zdroji Agilent E3634 a Tesla BS525, které spojí střed napájení OZ s kladnou svorkou regulovaného napětí. Napájecí napětí OZ je pak plovoucí vůči napětí regulovanému a není nutné použít vysokonapěťové OZ. Nevýhodou je potřeba samostatného vinutí transformátoru napájejícím OZ. Toto zapojení je podrobně popsáno v literatuře [38]. Na obr. 20 v kapitole 6 je blokové schéma celého zdroje, kde jsou všechny části ukázány, jak jsou za sebou zapojeny. Na obr. 36 je v blokovém schématu ukázána regulační část zdroje, která se skládá z několika výkonových tranzistorů zapojených paralelně k sobě, z důvodu rozdělení výstupního proudu. Výstupní proud se rozdělí mezi čtyři výkonové tranzistory. Kdyby se to neudělalo, tak by se tranzistory za určitých podmínek mohly zahřát nad přípustnou hodnotu a došlo by k jejich zničení. Další součástí blokového schématu je rezistor, pomocí kterého se odečítá výstupní proud celého stabilizovaného zdroje a několik operačních zesilovačů.

První operační zesilovač je zapojen jako rozdílový zesilovač. Pomocí něj se zesílí napětí ze snímacího rezistoru, který se přivede na další operační zesilovač. Díky úbytku na známém rezistoru jsme schopni zjistit proud tímto rezistorem a tedy i výstupní proud stabilizovaného zdroje. Tento rezistor musí mít malý odpor, aby se vlivem výkonové ztráty příliš nezahříval a neměnil jeho hodnotu.

Druhý operační zesilovač porovnává mezi sebou dvě napětí. Neznámé napětí U_x , kterým je úbytek napětí na rezistoru, přivedené z výstupu prvního operačního zesilovače a napětí referenční U_{ref} .



Obr. 36 Blokové schéma regulační části zdroje

6.9.1 Rozdílový zesilovač

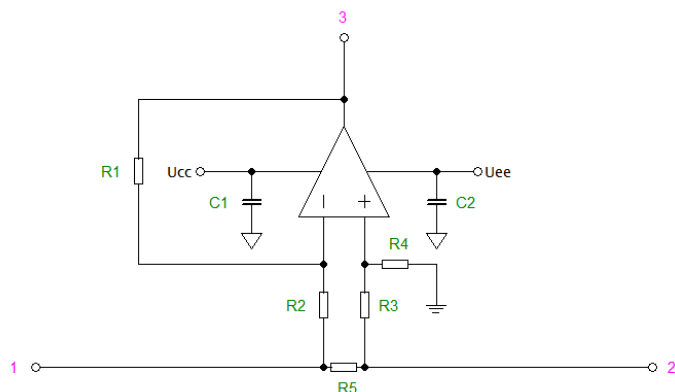
Rozdílový zesilovač zesiluje napětí, které má připojené mezi vstupními svorkami. Velikost zesílení se dá nastavit pomocí kombinace rezistorů. Na obr. 37 je znázorněn rozdílový zesilovač připojený na rezistor $R5$. Na rezistoru $R5$ je úbytek napětí, který je úměrný výstupnímu proudu. Na svorky U_{cc} a U_{ee} je připojeno napájecí napětí operačního zesilovače. Aby zesilovač pracoval správně a zesiloval rozdílové napětí mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem, musí splňovat podmínku

$$\frac{R1}{R2} = \frac{R4}{R3} \quad (6.9)$$

Velikost výstupního napětí je pak dána podle vzorce

$$U_0 = \frac{R1}{R2} \cdot (U_2 - U_1) \quad (6.10)$$

Kde U_2 udává napětí na neinvertujícím vstupu OZ a U_1 napětí na invertujícím vstupu OZ. Výstup rozdílového zesilovače je zapojen do komparátoru pro regulaci výstupního proudu.



Obr. 37 Rozdílový zesilovač

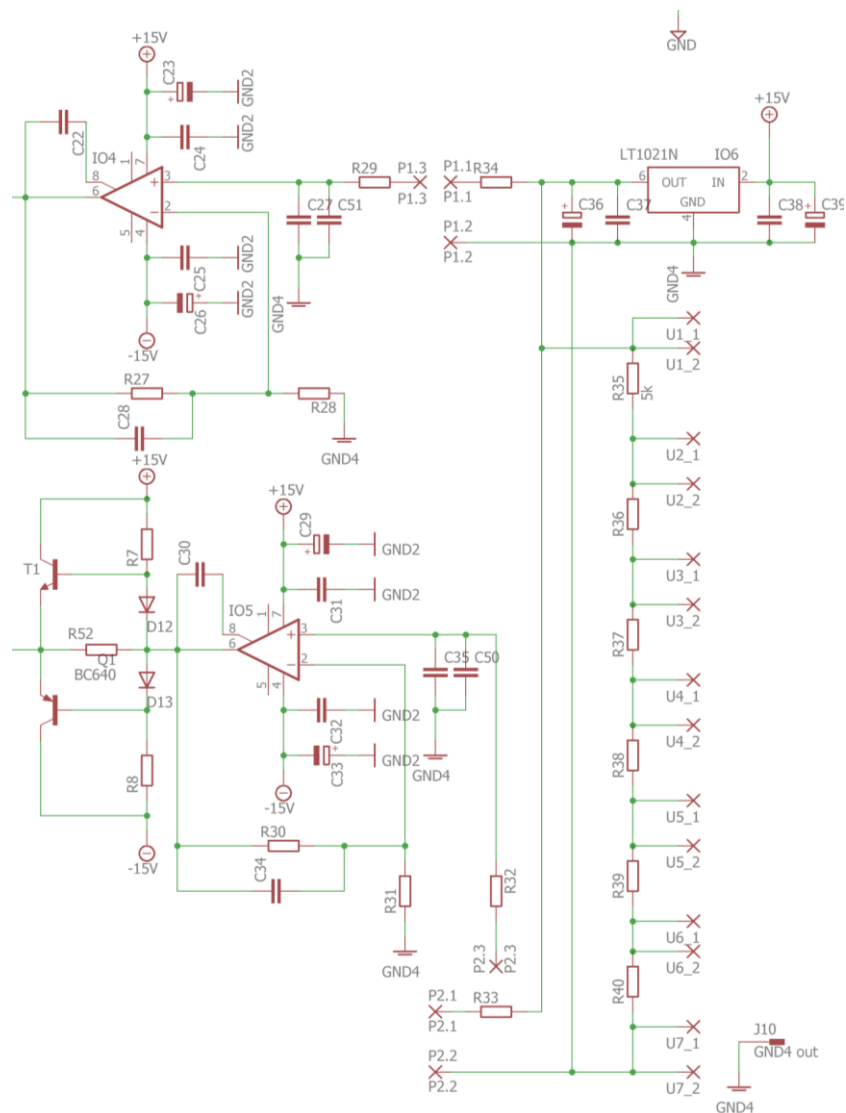
6.9.2 Regulace napětí a proudu

Napětí a proud se budou ve zdroji regulovat pomocí dvou potenciometrů. Jeden bude regulovat proud a jeden výstupní napětí. Potenciometry jsou zapojeny jako odporový dělič a snižují nebo zvyšují výstupní napětí referenčního zdroje. Zapojení referenčního zdroje a k němu připojených potenciometrů je zobrazeno na obr. 38, kde IO6 je referenční zdroj LT1021. Potenciometr P_1 slouží k regulaci výstupního proudu a potenciometr P_2 k regulaci výstupního napětí. Před potenciometr P_2 je vloženo ještě několik rezistorů. Nastavování výstupního napětí bude mít totiž dva režimy.

První bude jemná regulace, kde si bude moci obsluha navolit pomocí těchto rezistorů rozsah napětí po 10 V a pak pomocí potenciometru jemně doregulovat napětí. Napětí si tedy bude moci obsluha volit z rozsahů 0 – 10 V, 10 – 20 V, 20 – 30 V, 30 – 40 V a 40 – 50 V. Jedná se o variantu Kelvin - Varleyova děliče.

Druhý režim bude hrubá regulace, kde si může obsluha navolit příslušné napětí jen pomocí potenciometru. K přepínání režimů a rozsahů bude sloužit otočný spínač umístěný na předním panelu zdroje.

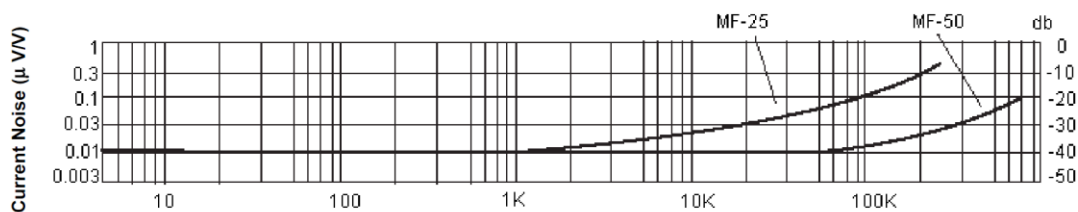
Otočný spínač je typu 6 krát 2. To znamená, že má 6 poloh. Z toho 5 slouží ke změně rozsahů. Otočný spínač je zapojen na konektory U1_1, až U7_2, které jsou zobrazeny na následujícím obrázku. Pomocí rezistorů R35 až R40 jsou navoleny rozsahy výstupního napětí.



Obr. 38 Regulace napětí a proudu – první část

Výstupy obvodů IO4 a IO5 jsou dále zapojeny na neinvertující vstupy obvodů IO1 a IO2 jejichž schéma zapojení je na obr. 40. IO1 je zapojeno k IO4 a slouží k regulaci proudu. IO2 je zapojeno přes několik rezistorů na IO5 a slouží k regulaci napětí. Tyto rezistory slouží jako odporový dělič. Vzhledem k tomu, že je zdroj koncipován jako nízkošumový a s větší teplotou na rezistorech by se zvětšoval i jejich šum bylo zapojeno více rezistorů do série, aby se výkon rozdělil mezi ně a jejich teplota příliš nestoupala. Rezistory uplatňující se v zesilovacím řetězci byly navíc vybrány jako nízkošumové. U renomovaných výrobců Vishay je udávána hodnota přídavného proudového šumu jako zanedbatelná, výrobce multicom u nejvíce používaného typu rezistoru 500 Ω udává závislost na obr. 39. Pro rezistor MCMF0W4BB1002A50 (typ MF-25) by měla být typicky pod 0,01 $\mu\text{V/V}$.

Current Noise Level

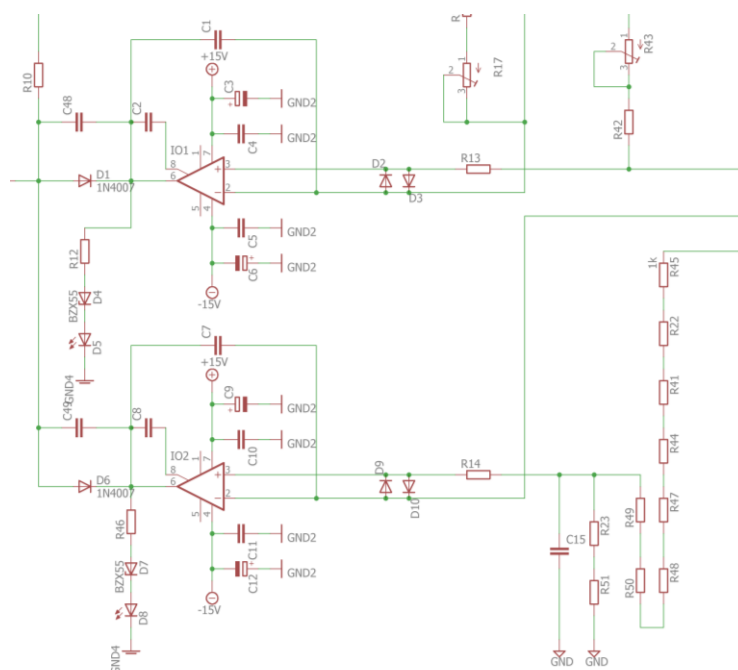


Obr. 39 Závislost přídavného proudového šumu u rezistorů výrobce Multicomp

Obvody IO1 a IO2 porovnávají napětí z referenčního zdroje, které je měněno pomocí potenciometrů s výstupním napětím. Výstupní napětí zdroje je přivedeno na jejich invertující vstupy. Výstupy těchto obvodů jsou přivedeny na bázi výkonových tranzistorů a regulují tak výstupní parametry.

Diody D_5 a D_8 slouží obsluze k rozlišení, jestli je zdroj v režimu konstantního proudu nebo a napětí a tím i k rozlišení toho, který potenciometr je v dané chvíli aktivní.

Všechny integrované obvody jsou napájeny pomocí plovoucího napětí +15 V a -15 V, které je plovoucí vůči kladné svorce výstupního napětí.



Obr. 40 Regulace napětí a proudu – druhá část

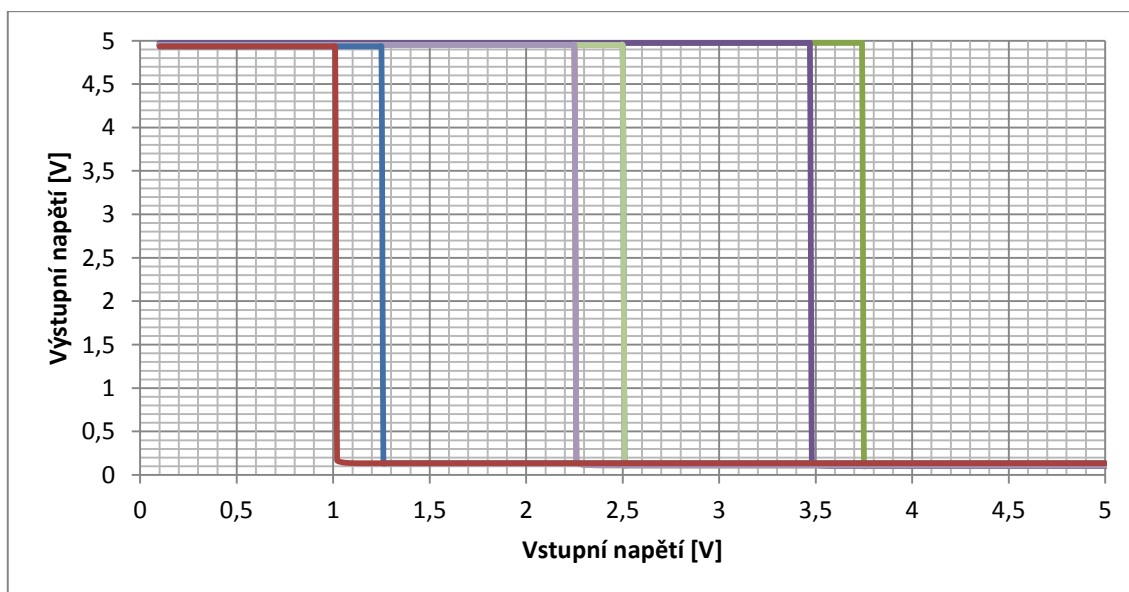
7 SIMULACE

Zapojení navrhovaného zdroje bylo odzkoušeno a ověřeno pomocí návrhového simulátoru Pspice. Tato kapitola zobrazuje a popisuje použité simulace stabilizovaného zdroje.

7.1 Simulace komparátoru

Simulovaný komparátor se nachází na zdrojové desce a slouží k přepínání odboček transformátoru pomocí spínání relé. Návrh a hodnoty součástek jsou popsány v předchozích kapitolách.

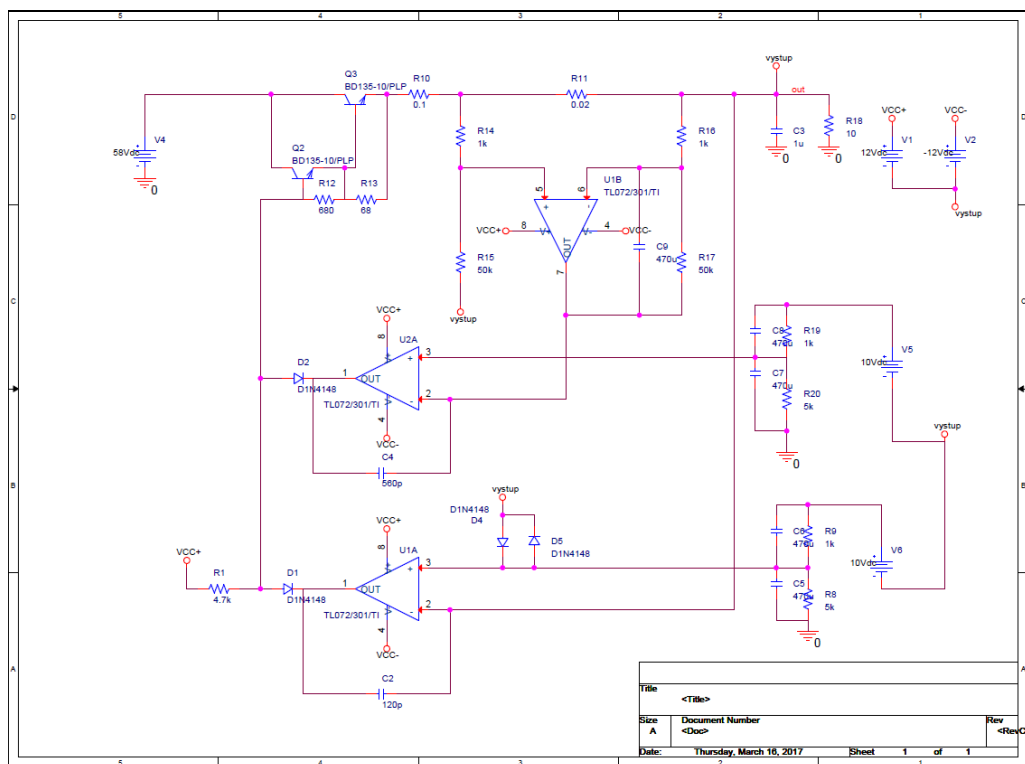
Na obr. 41 jsou zobrazeny tři hysterezní smyčky komparátorů, které složí k přepínání odboček transformátoru. Odbočky se budou přepínat zhruba po 12,5 V. Na vstupy komparátorů je napětí přiváděno přes dělič napětí a hodnoty na jeho vstupu jsou tedy desetkrát menší. Naměřená data v grafu vychází ze simulace v programu Pspice.



Obr. 41 Hysterezní smyčky komparátoru pro přepínání odboček transformátoru

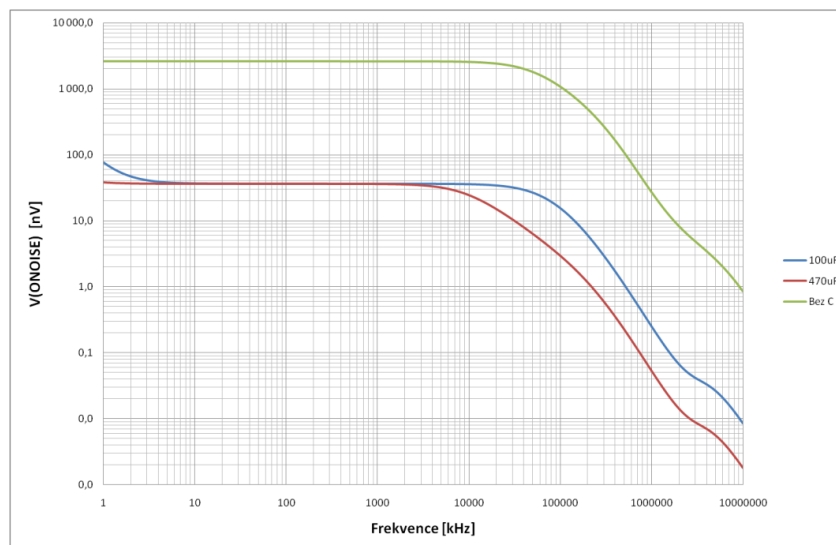
7.2 Simulace výstupního šumu

Na obr. 42 je schéma zapojení obvodu v programu Pspice. V této simulaci se zkoušel vliv kondenzátorů připojených paralelně k rezistorům na šumové vlastnosti obvodu. Kondenzátory jsou připojeny paralelně k rezistorům R8, R9, R19 a R20. Simulace probíhala pro několik kapacit kondenzátorů a také pro zapojení bez kondenzátorů. Vybrané rezistory slouží v zapojení jako děliče napětí připojené k referenčnímu napětí.



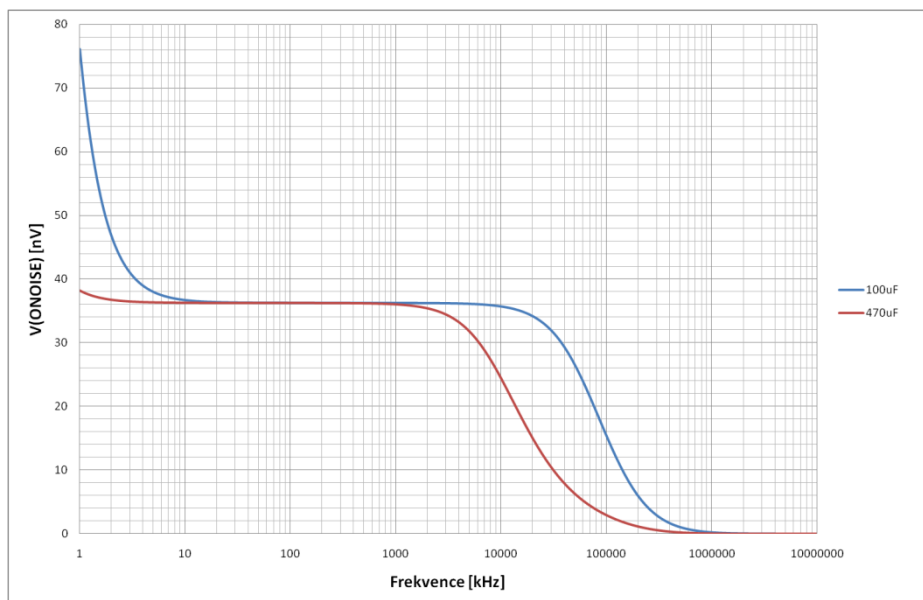
Obr. 42 Simulace šumu obvodu

Výsledek simulace je graficky znázorněn na obr. 43. Simulace byla provedena pro dvě kapacity kondenzátorů. Pro $C_1 = 100\mu\text{F}$ a pro $C_2 = 470\mu\text{F}$. Simulovaný byl i stav bez kondenzátorů. V grafu je zobrazen výstupní šum v závislosti na frekvenci. Z grafu je patrné, že v zapojení bez kondenzátorů výrazně vystoupal výstupní šum oproti zapojení s kondenzátory. Mezi změnou hodnoty kapacity už byl rozdíl mezi výstupními šumy menší. Ze simulace tedy vychází, že pro lepší šumové vlastnosti obvodu je lepší zapojit k rezistorům paralelně kondenzátor.



Obr. 43 Závislost výstupního šumu na kapacitě kondenzátoru

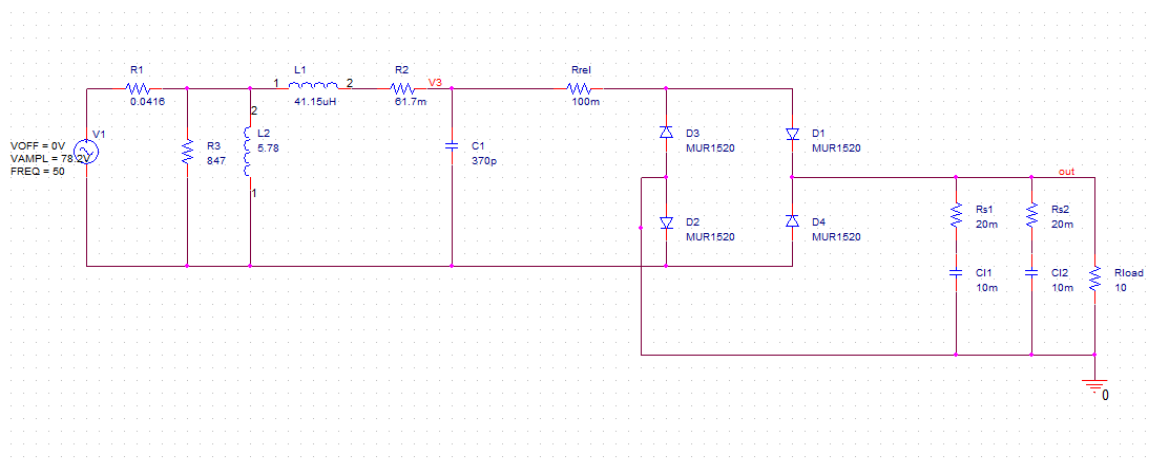
Na obr. 44 je zobrazen detailnější pohled na výstupní šum obvodu při zapojení kondenzátorů. Je zde vidět patrný rozdíl výstupního šumu při změně kapacity. Lepších šumových vlastností dosáhl obvod v simulaci s větší hodnotou kapacity a to tedy pro kondenzátor $C_2 = 470 \mu\text{F}$.



Obr. 44 Detailní zobrazení grafické závislosti výstupního šumu na kapacitě kondenzátoru

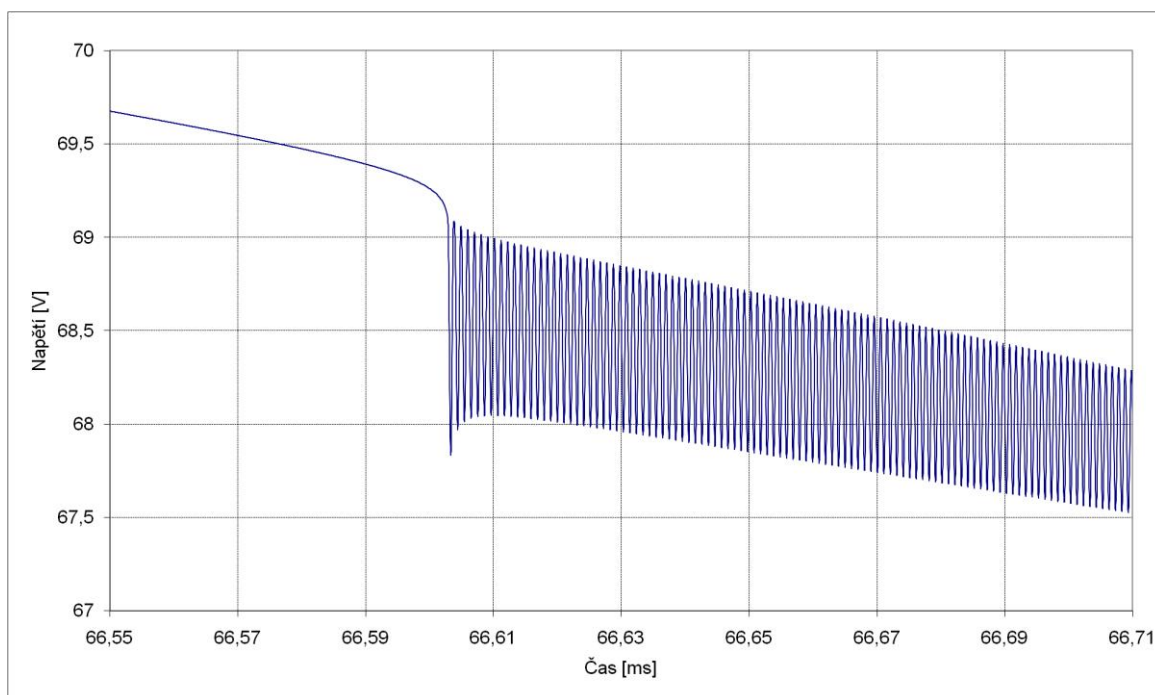
7.3 Simulace kmitání napětí na usměrňovací diodě

Na výstupu usměrňovacích diod mohou vznikat za nepříznivých podmínek nežádoucí kmity při uzavření diody. Pomocí simulace obvodu napájecí části zdroje byla vybrána nejvhodnější varianta zapojení obvodu, aby se toto kmitání co nejvíce odstranilo. V simulátoru byly použity tři varianty zapojení. První varianta obsahuje jen diody MUR1520, v zapojení můstkového usměrňovače. Schéma zapojení k této variantě je na obr. 45, kde námi simulované diody jsou diody D1 až D4.



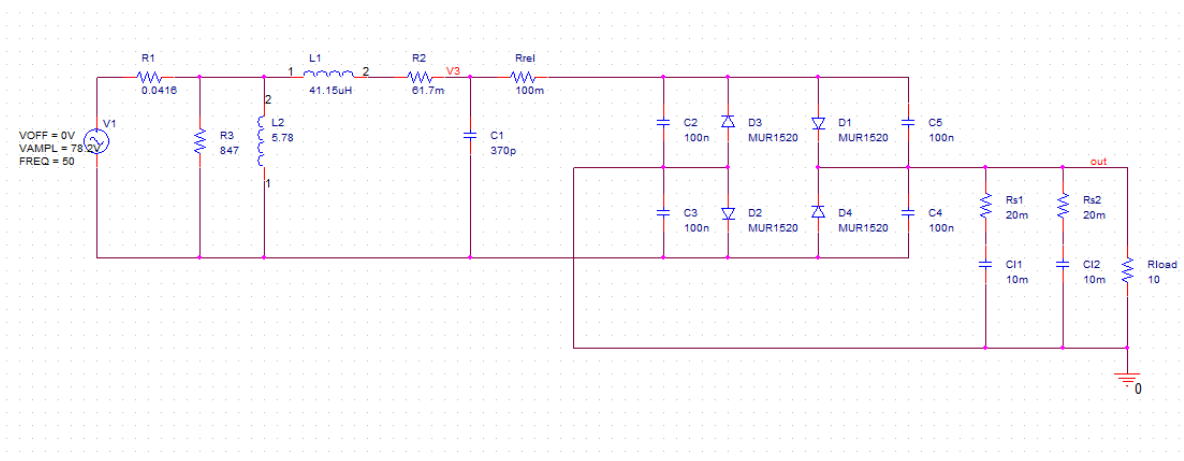
Obr. 45 Schéma zapojení pro simulování kmitání na diodě MUR1520

Grafické znázornění kmitání výstupního napětí na diodě a tedy výstupní graf simulátoru je na obr. 46. Na obrázku je patrné kmitání s velmi vysokou frekvencí.



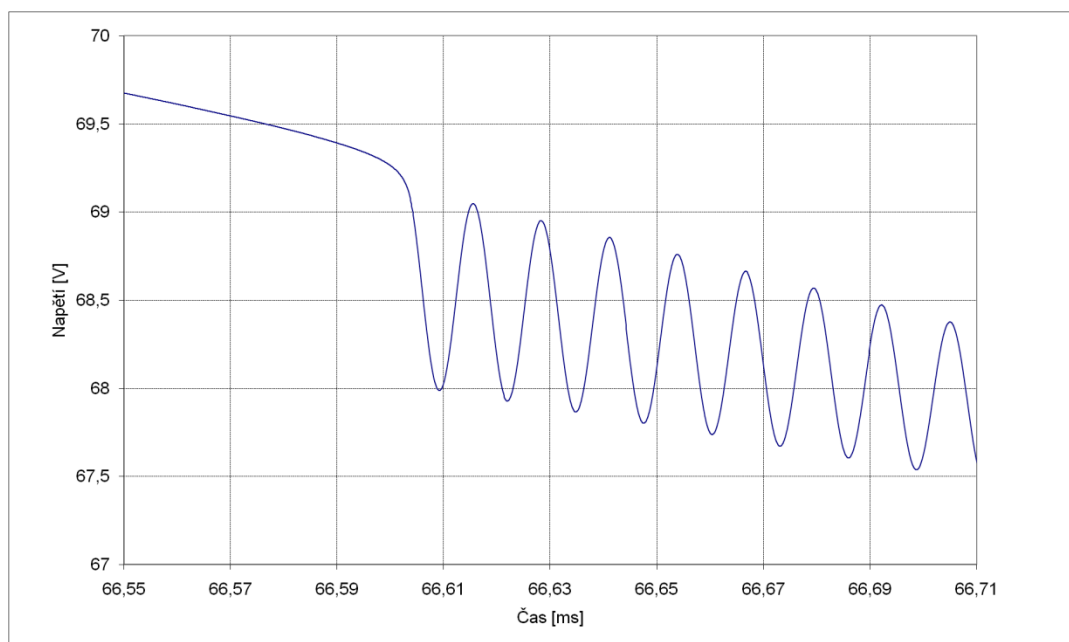
Obr. 46 První varianta zapojení usměrňovacích diod

Druhá simulovaná varianta zapojení je na obr. 47. V tomto zapojení, je ke každé diodě připojen paralelně kondenzátor, který by měl zlepšit výstupní charakteristiku a odstranit kmitání.



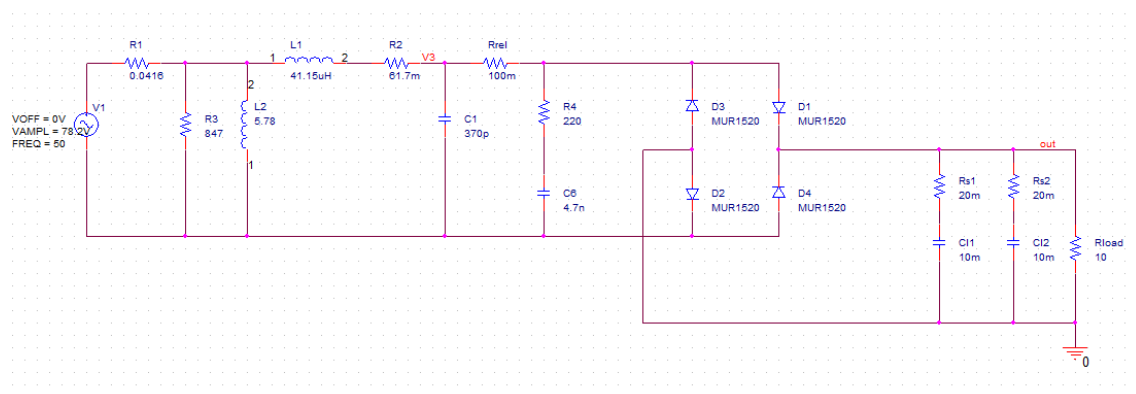
Obr. 47 Schéma zapojení pro simulování kmitání na diodě s paralelním kondenzátorem

Kmitání výstupního napětí druhé varianty je zobrazeno na obr. 48. Oproti prvnímu zapojení je zde patrné, že se frekvence kmitů výrazně snížila, ale ještě stále je zde viditelná. Amplituda kmitů v porovnání s předchozí variantou zůstala stejná.



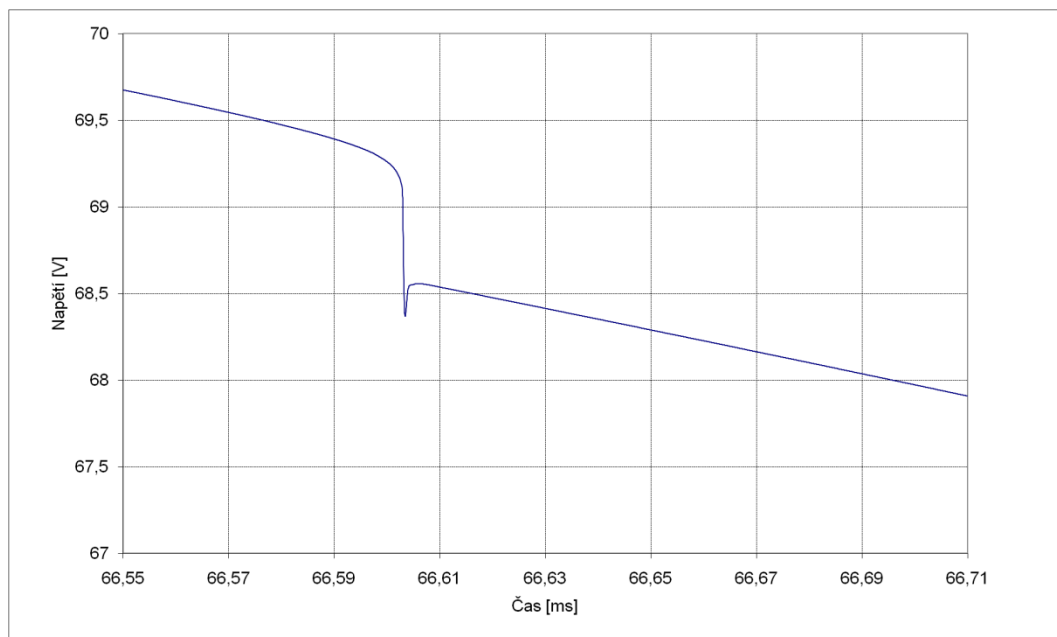
Obr. 48 Druhá varianta zapojení usměrňovacích diod

Třetí varianta zapojení obsahuje RC článek, tedy sériové zapojení kondenzátoru a rezistoru, které jsou paralelně zapojeny ke vstupu diodového můstku. Schéma zapojení je zobrazeno na obr. 49. Vložený rezistor a kondenzátor jsou na obrázku níže označeny jako R_4 a C_6 .



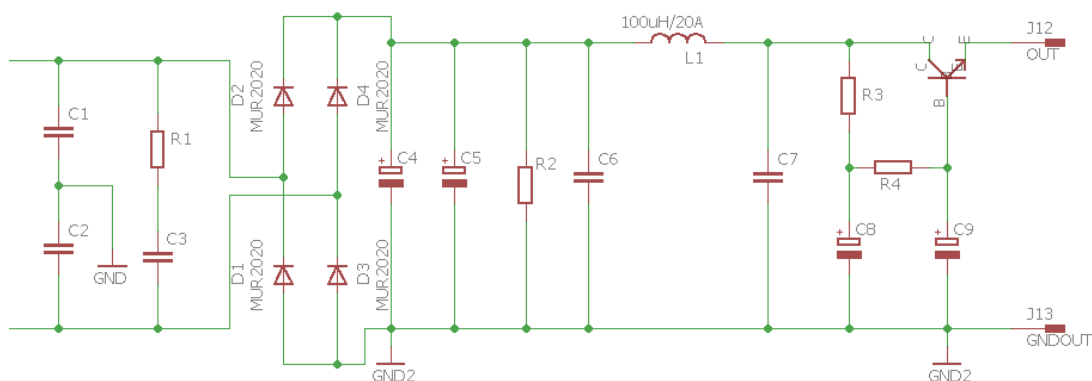
Obr. 49 Schéma zapojení pro simulování kmitání na diodě s paralelním RC obvodem

Výstupní napětí obvodu pro třetí variantu s vloženým RC článkem je graficky znázorněno na následujícím obrázku (obr. 50).



Obr. 50 Třetí varianta zapojení usměrňovacích diod

Je patrné, že při zapojení RC obvodu paralelně ke vstupu diodového můstku se odstraní nechtěné kmitání na výstupu diod. Ze všech tří odsimulovaných obvodů se poslední třetí varianta jeví jako nejlepší řešení a proto je použita i v napájecí části navrhovaného zdroje. Tento RC člunek byl vložen do zdrojové desky paralelně k diodovému můstku. Pro diodový můstek byly nakonec použity diody MUR2020, jelikož dioda MUR1520 nevyhovovala hodnotou svého špičkového proudu. Zapojení RC člunku je zobrazeno na obr. 51 a tento člunek představuje rezistor R_1 a kondenzátor C_3 .



Obr. 51 Schéma zapojení RC člunku v navrhovaném zdroji

8 MĚŘENÍ NAVRŽENÉHO ZDROJE

Tato kapitola popisuje měření skutečných hodnot navrhovaného zdroje a veškerých jeho součástí. Veškeré změřené hodnoty jsou zapsány v tabulkách nebo graficky zobrazeny.

8.1 Měření skutečných parametrů transformátoru

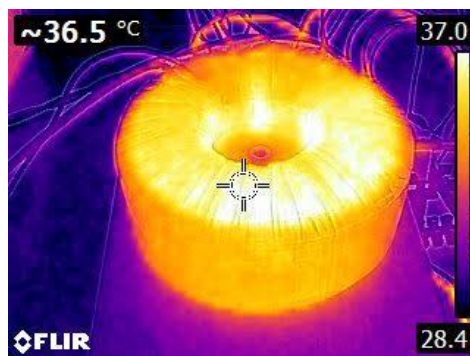
Tato kapitola popisuje měření parametrů navrhovaného a vyrobeného transformátoru. V textu je popsáno měření výstupních napětí, měření transformátoru naprázdno, měření odporu vodičů primárních a sekundárních vinutí, měření kapacit mezi vinutími a také měření transformátoru termokamerou.

V tab. 19 jsou zobrazeny naměřené hodnoty výstupního napětí na jednotlivých odbočkách transformátoru. Vývody jsou od sebe barevně odlišeny. Tabulka obsahuje hodnoty výstupního napětí při třech variantách vstupního síťového napětí 207 V, 230 V a 253 V. Tyto hodnoty byly zvoleny z důvodu, že poskytovatelé elektrické energie garantují síťové napětí v rozmezí 207 až 253 V

Na obr. 52 je fotografie navrženého transformátoru. Z fotografie je patrné, že zařízení má několik vývodů, které jsou od sebe barevně odlišeny. Vývody 2 – 5 s vodiči barvy hnědá, oranžová, modrá a šedá slouží k napájení výstupních svorek stabilizovaného zdroje a uvnitř zdroje se mezi nimi bude přepínat pomocí relé. Zapojení těchto vývodů je patrné na obr. 33 v předcházející kapitole. Těmito vývody potečou také největší proudy. Vývody 6 – 8 s barevným označením vodičů fialová, žlutá a zelená slouží k napájení drobnějších zařízení uvnitř stabilizovaného zdroje. Budou napájet ventilátory sloužící k chlazení zdroje a budou sloužit i k napájení operačních zesilovačů. Napájení ventilátorů bude zajišťovat vývod číslo 6 s fialovou barvou vodiče. Zbylé dva vodiče číslo 7 a 8 budou napájet operační zesilovače.

Tab. 19 Skutečná napětí jednotlivých vinutí transformátoru naprázdno pro $U_1 = 230$ V

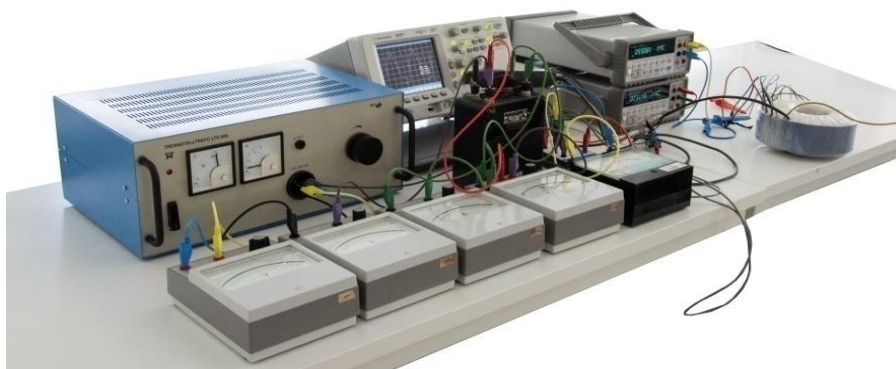
Vinutí	Vodiče	Výstupní napětí [V]
N_2	hnědá – bílá	20,64
N_3	oranžová – bílá	32,54
N_4	modrá – bílá	43,90
N_5	šedá – bílá	55,30
N_6	fialová – bílá	16,80
N_7	žlutá – bílá	16,87
N_8	zelená – bílá	16,83



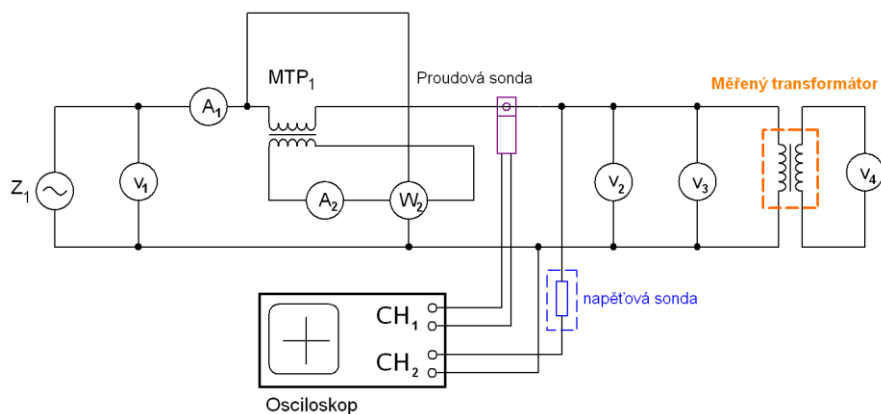
Obr. 52 Měřený transformátor vlevo, termosnímek transformátoru při plném zatížení vpravo

Na obr. 52 je zobrazen termosnímek. Ten snímek byl pořízen při maximálním zatížení transformátoru, které by mohlo nastat při běžném používání. Transformátor byl zatížen dvěma reostaty. Snímek byl pořízen přibližně po hodině měření, kdy teplota transformátoru stoupla na hodnotu 36,5 °C.

Na obr. 53 je fotografie zapojení měřících přístrojů pro měření transformátoru naprázdno. K měření bylo použito několik ručkových měřících přístrojů, zdroj síťového napětí, osciloskop a digitální multimetr. Všechny použité měřicí přístroje používané při měření jsou zapsány v příloze C. Použité schéma zapojení je na obr. 54.



Obr. 53 Zapojení měřícího pracoviště pro měření transformátoru

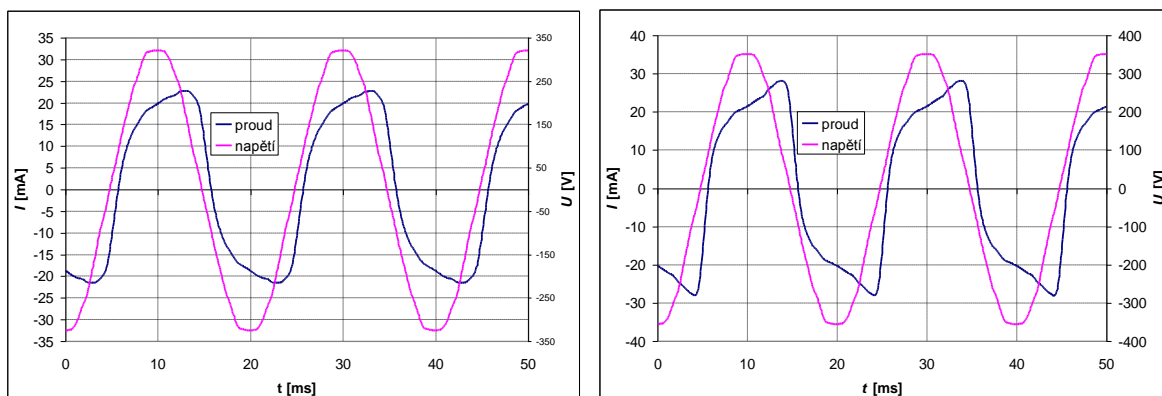


Obr. 54 Schéma zapojení měření transformátoru naprázdno

V tab. 20 jsou zapsány výsledné hodnoty pro měření naprázdno. Jelikož navržený transformátor je vyroben z kvalitních transformátorových plechů a požadavkem návrhu bylo nízké syčení $B_{\text{Max}}=1,4 \text{ T}$, jsou ztráty naprázdno velmi malé. Proto bylo oproti normě použito zapojení pro měření vyšších impedancí, korekce na spotřebu napěťové cívky wattmetru by byla totiž výrazně vyšší než korekce na spotřebu ampérmetru a proudové cívky wattmetru. Dále se ještě příliš neprojevuje nelinearita magnetizační charakteristiky transformátorových plechů a magnetizační proud pro napětí sítě 230 V je téměř harmonický. Při zvýšeném síťovém napětí 253 V je již patrná typická třetí harmonická na jeho průběhu. Tyto hodnoty jsou pak dále zaneseny do grafů, které jsou zobrazeny na obr. 55. Naměřené hodnoty získané pomocí osciloskopu a klasických analogových měřicích přístrojů se významně neliší. Jako přesnější lze prohlásit měření pomocí osciloskopu, kvůli nízké hodnotě magnetizačního proudu pracoval měřicí transformátor proudu mimo oblast kde má garantovanou třídu přesnosti (méně než 5 % z 5 A jmenovitého sekundárního proudu) a také výchylka wattmetru byla na počátku stupnice. U proudové sondy byla před měřením provedena kompenzace nuly, jinak by mohla chyba při měření proudu dosáhnout až 20 mA. Vyšší citlivosti proudové sondy se dosáhlo navinutím pěti závitů přes kleště proudové sondy. Harmonický průběh budícího napětí byl kontrolován pomocí činitele tvaru k_t , získaného jako poměr údaje voltmetru V_3 měřící efektivní hodnotu napětí a V_2 měřící absolutní střední hodnotu napětí. Z poměru blízkého hodnotě jedna plyne nízké zkreslení budícího napětí a nejsou nutné dodatečné opravy.

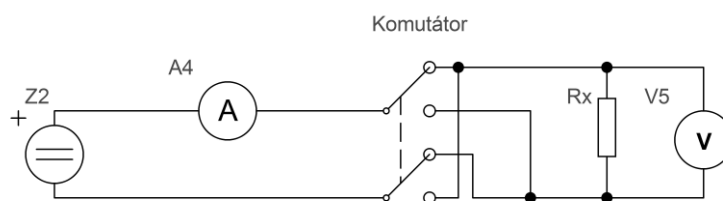
Tab. 20 Měření transformátoru naprázdno

V_3	A_2	Osc	V_2			P_1			Osc	k_t	V_4
V	A	mA	α_v	k_v	V	α_w	k_w	W	W	-	V
207	0,16	14,4	103	$\frac{240}{120}$	206	7,5	$\frac{300 \cdot 5}{75} \cdot 0,2 \cdot \frac{0,5}{5}$	3	2,94	1,00	49,7
230	0,18	17,3	114	$\frac{240}{120}$	228	9	$\frac{300 \cdot 5}{75} \cdot 0,2 \cdot \frac{0,5}{5}$	3,6	3,61	1,01	55,3
253	0,21	19,0 3	25,5	$\frac{600}{60}$	255	11	$\frac{300 \cdot 5}{75} \cdot 0,2 \cdot \frac{0,5}{5}$	4,4	4,51	0,99	60,97



Obr. 55 Průběhy napětí a proudu primárního vinutí pro 230 V (vlevo) a 253 V (vpravo)

Další měřenou vlastností transformátoru je odpor vinutí transformátoru. Odpor vinutí má nízkou hodnotu, a proto byl měřen metodou pro měření velmi malých odporů, zde konkrétně pomocí Ohmovy metody s použitím čtyřsvorkového zapojení, které eliminuje vliv přechodových odporů a odporů přívodů. Abychom mohli eliminovat i vliv termoelektrického napětí, byl v zapojení použit komutátor. S použitím komutátoru, byly tedy zaznamenány dvě hodnoty napětí U_{X1} a U_{X2} , každá s různým směrem proudu. Z těchto dvou hodnot napětí bylo pak vypočítáno aritmetickým průměrem napětí U_X a z něj následně pomocí Ohmova zákona výsledný odpor vinutí. Podle normy ČSN 351086 by se mělo měřit kvůli omezení oteplení vinutí maximálně pro 0,2 násobek jmenovitého proudu vinutí transformátoru, což bylo splněno. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou zapsány v tab. 21. Zapojení měřicího pracoviště je zobrazeno na obr. 56.



Obr. 56 Zapojení pracoviště při měření malých odporů

Tab. 21 Naměřené hodnoty odporu primárního a sekundárního vinutí transformátoru

Vinutí	Barva	I [A]	U_{X1} [mV]	U_{X2} [mV]	U_X [mV]	R_X [mΩ]
N_1	-	1,0	725,70	-724,20	724,95	725
N_2	hnědá	2,0	51,76	-51,63	51,70	25,9
N_3	oranžová	2,0	99,25	-99,48	99,37	49,7
N_4	modrá	2,0	75,61	-75,51	75,56	37,8
N_5	šedá	2,0	123,41	-123,53	123,47	61,7
N_6	fialová	0,2	21,78	-21,67	21,73	109
N_7	žlutá	0,2	43,36	-43,37	43,37	217
N_8	zelená	0,2	43,26	-42,96	43,11	216

Pro získání náhradního modelu transformátoru použitého v simulaci kmitání diod v usměrňovacím můstku, zbývá určit hodnotu rozptylové indukčnosti transformátoru. Ta má velmi malou hodnotu, jelikož transformátor je toroidního provedení a navíc je ještě magneticky stíněn. Klasické měření transformátoru nakrátko by bylo zatíženo takovou chybou měření, že bychom na kmitočtu 50 Hz získali pouze činný odpor vinutí a hodnotu rozptylové indukčnosti bychom znali velmi neurčitě. Takové měření se hodí spíše pro klasické transformátory ze skládaných transformátorových plechů například typu EI, kde je vyšší rozptylový indukční tok. Proto se využilo skutečnosti, že na rozdíl

od magnetizační indukčnosti, která je silně nelineární a její hodnota závisí na budícím napětí, je rozptylová indukčnost lineární, jelikož se uzavírá magnetický indukční tok přes vzduch. Je možné ji proto změřit na přesném RLCG můstku. Využil se přístroj Tesla BM595 a měřilo se sériové náhradní schéma indukčnosti. Je důležité, aby všechna ostatní vinutí kromě měřeného byla zkratována, jejich impedance se transformuje též na měřené vinutí. Výsledky jsou zpracovány v tab. 22. Sériový odpor vyjadřuje odpor měřeného vinutí a transformovaný odpor vinutí primárního. Je kmitočtově závislý na Skin efektu a změně transformačního poměru podle použitého materiálu jádra. Na nízkých kmitočtech je fáze měřené impedance blízká nule, proto lze za přesnější určení rozptylové indukčnosti L_s považovat kmitočet 1 kHz, kde je již vyšší imaginární složka měřené impedance.

Tab. 22 Měření rozptylové indukčnosti vinutí

Vinutí	Frekvence [Hz]	Odpor [$m\Omega$]	Indukčnost [μH]
N_2	100	34,82	5,20
N_3	100	80,50	24,02
N_4	100	56,32	12,95
N_5	100	108,00	39,80
N_2	1000	37,78	4,60
N_3	1000	101,73	18,97
N_4	1000	66,25	10,70
N_5	1000	141,40	29,97

V tab. 23 jsou zobrazeny naměřené kapacity primárních a sekundárních vinutí na frekvenci 1 kHz. Kapacita na primárním vinutí byla změřena mezi vodičem připojeným k primární straně transformátoru a zemnicím zelenožlutým vodičem. Měření kapacity na sekundární straně probíhalo mezi zelenožlutým vodičem a příslušným měřeným vodičem sekundárního vinutí. Posledním měřeným údajem je kapacita mezi primárním a sekundárním vinutím.

Tab. 23 Měření kapacit mezi vinutími

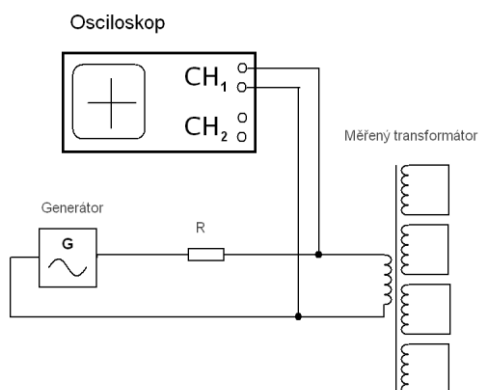
Vinutí	Barva	Kapacita [pF]
N_1	-	2199,0
N_5	Šedá	2560,0
N_6	Fialová	458,5
N_7	Žlutá	424,2
N_8	Zelená	439,8
Mezi N_1 a N_1	-	1178

Pro účely simulací transformátoru a k němu připojených obvodů v programu Pspice bylo z naměřených hodnot vytvořeno náhradní schéma transformátoru obr. 58, kde R_1 představuje transformovaný odpor primárního vinutí, R_2 je odpor vyjadřující ztráty v železe, R_3 odpor sekundárního vinutí, L_1 vyjadřuje hlavní reaktanci transformátoru a L_2 jsou reaktance vinutí. Jedná se o náhradní schéma z hlediska sekundární strany, jak bude simulováno v Pspice.

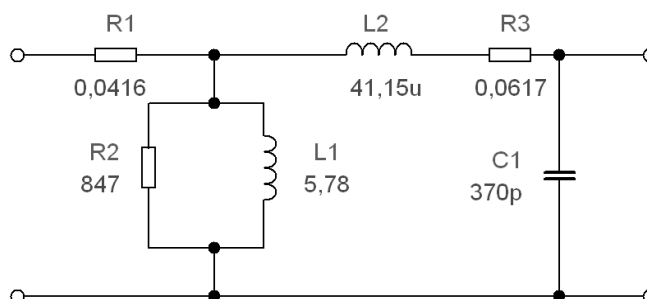
Měření kapacity vinutí se provedlo podle doporučení Doc. Patočky v jeho knize „Magnetické jevy a obvody“ a oproti jiným autorům byla ostatní vinutí zkratována a měřila se rezonance rozptylové indukčnosti s kapacitou vinutí. Tento přístup se zvolil kvůli nelinearitě magnetizační indukčnosti závislé, jak na buzení, tak na kmitočtu zatímco rozptylová indukčnost by na těchto veličinách měla být relativně nezávislá. Výsledky jsou uvedeny v tabulce tab. 24. Zapojení pracoviště je zobrazeno na obr. 57. Použitý rezistor R měl hodnotu 10 k Ω .

Tab. 24 Měření kapacit vinutími

Vinutí	Rezonance [kHz]	Kapacita vinutí [pF]
Primární	216	603
sekundární	1290	370



Obr. 57 Zapojení pracoviště při měření kapacity vinutí

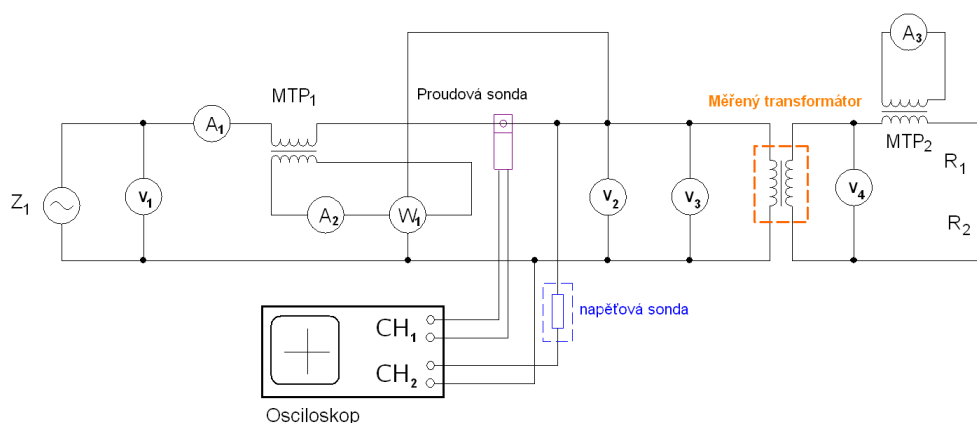


Obr. 58 Náhradní schéma transformátoru z pohledu sekundární strany

Pro ověření, jak transformátor vyzařuje elektromagnetické pole do svého okolí, se

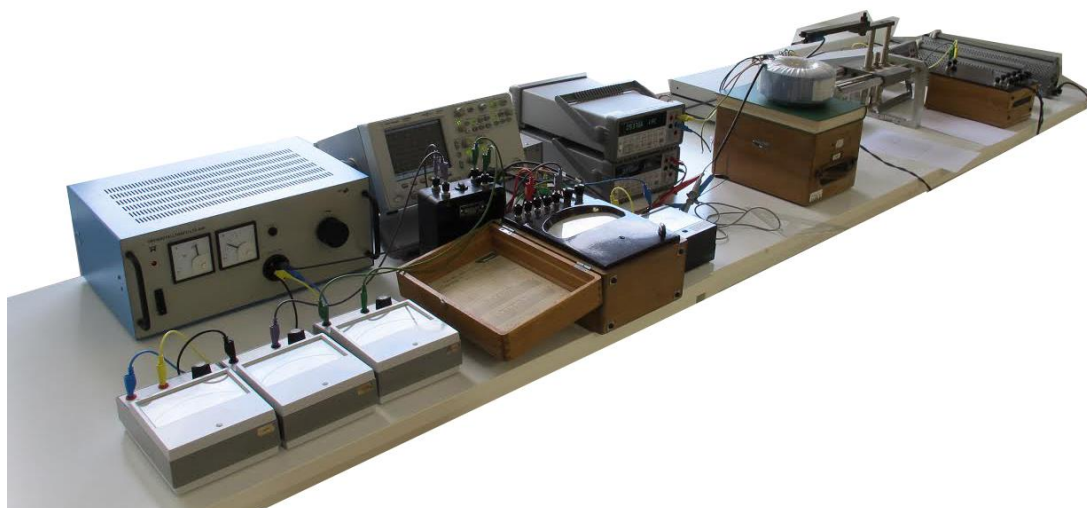
provedlo měření při zatížení. Pro tyto účely byl transformátor zatížen téměř na své plné zatížení (12 A na svém sekundárním vinutí N_2). Pomocí tříosého gaussmetru pak bylo podrobně zmapováno magnetické pole o kmitočtu 50 Hz vytvářené v jeho okolí. Nebude tím sice plně simulován reálný provoz transformátoru, kdy je proud odebírán v krátkých pulzech během nabíjení filtračního kondenzátoru, ale pro ověření rozložení elektromagnetického pole měření vyhovuje. Zároveň se ověřila během měření povrchová teplota transformátoru a jeho účinnost.

Na obr. 59 je zobrazeno schéma zapojení pracoviště při měření transformátoru při zatížení. Jako zátěž byly zvoleny dva reostaty R_1 a R_2 .



Obr. 59 Schéma zapojení měření transformátoru při zatížení

Fotografie měřicího pracoviště pro měření transformátoru při zatížení zdroje je zobrazena na obr. 60.



Obr. 60 Zapojení měřicího pracoviště pro měření transformátoru při zatížení

Naměřené hodnoty transformátoru při zatížení, pro vstupní napětí 230 V jsou zapsány v tab. 25. Na kmitočtu 50 Hz se neprojevuje fázový posuv mezi napětím a proudem u použitých reostatů, které spotřebovávají čistě činný výkon, proto byl činný výkon na sekundární straně vypočten jako součin napětí a proudu.

Tab. 25 Měření transformátoru při zatížení

V ₂	A ₁	Osc	V ₂			P ₁			Osc	p _{MTP1}	V ₄	A ₃	p _{MTP2}
V	A	A	α _V	k _V	V	α _W	k _W	W	W	A/A	V	A	A/A
230	2,9	2,9	114	$\frac{240}{120}$	228	67,5	$\frac{300 \cdot 5}{150}$	675	671	5/5	53,94	3,03	20/5

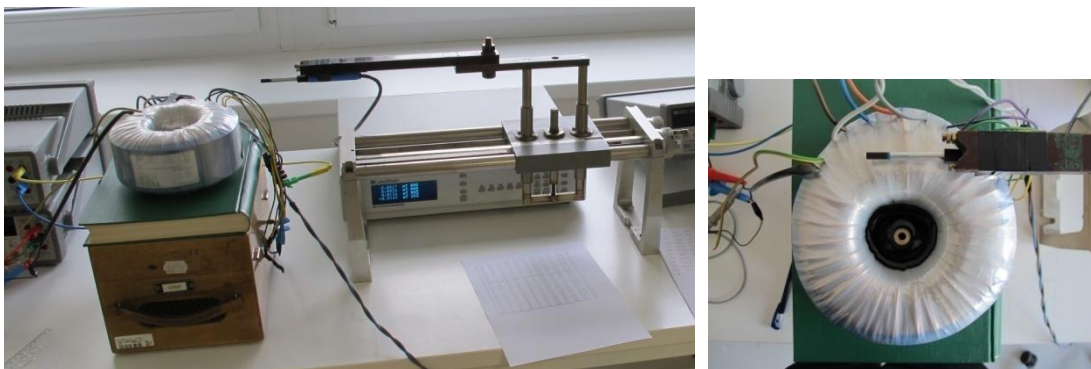
Pro malý rozdíl mezi příkonem transformátoru a jeho výkonem spotřebovávaným reostaty na sekundárním vinutí, je změřená účinnost určena s velkou chybou měření. Při uvažování měření příkonu pomocí staršího wattmetru vychází $\eta=96,9\%$, při měření pomocí digitálního osciloskopu a napěťové a proudové sondy je pak $\eta=97,4\%$. Pro kontrolu je výhodné vyjít z měření transformátoru naprázdno a odporů vinutí, z těchto hodnot vypočíst teoretickou účinnost. Nevýhodou je, že nebereme v úvahu vyšší odpor primárního i sekundárního vinutí vlivem jejich ohřevu při zatížení. Celkové ztráty pro 230 V jsou dány

$$P_Z = P_0 + P_K = P_0 + I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 = 3,6 + 14,4 = 18 \text{ W} \quad (7.1)$$

$$\eta = \frac{P}{P + P_Z} \cdot 100 = \frac{(53,94 \cdot 12,12)}{(53,94 \cdot 12,12) + 18} \cdot 100 = 97,3\% \quad (7.2)$$

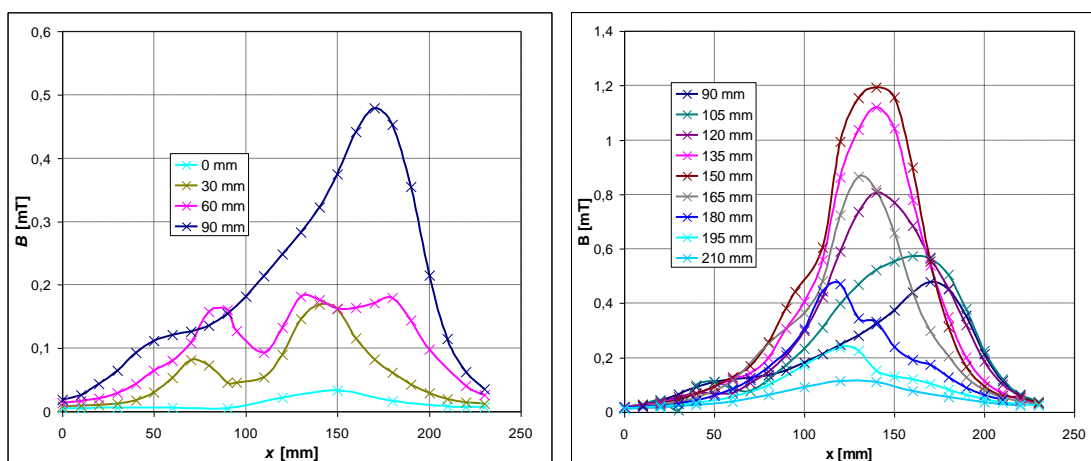
Všechny tři hodnoty účinnosti jsou si velmi blízké a hodnota účinnost transformátoru je v okolí 97 %. Kontrolní měření pomocí osciloskopu bylo u měření naprázdno i při zatížení prováděno proto, že nebylo jisté, jestli použité wattmetry stále splňují svoji třídu přesnosti. Nízké vertikální rozlišení osciloskopu 8 bitů bylo vylepšeno průměrováním z 32 hodnot, i tak je chyba stejnosměrného zesílení udávána podle výrobce u obou kanálů 2 % z rozsahu.

K mapování magnetického pole transformátoru byl použit tříosý gaussmetr Lake Shore 360 se sondou MNZ-2502-UH. Měření bylo provedeno ve výšce 10 mm nad povrchem toroidního transformátoru. Ukázalo značně nehomogenní rozložení magnetické pole nad toroidním transformátorem. U vývodů vinutí transformátoru dosahovalo hodnoty až 1,2 mT, na protější straně transformátoru pouze 180 μ T uprostřed vinutí. Reostaty byly připojeny kroucenou dvojlinkou pro omezení vyzařování magnetického pole. Díky použitému magnetickému stínění po obvodu transformátoru klesá rychle hodnota magnetického pole na jeho boku k 20 μ T. Měření ukázalo potřebnou správnou orientaci transformátoru v krabici zdroje pro minimalizaci magnetické vyzařování na desky plošných spojů. Magnetické stínění toroidního transformátoru je plně dostačující. Na obr. 61 jsou zobrazeny dvě fotografie pořízené při mapování magnetického pole.

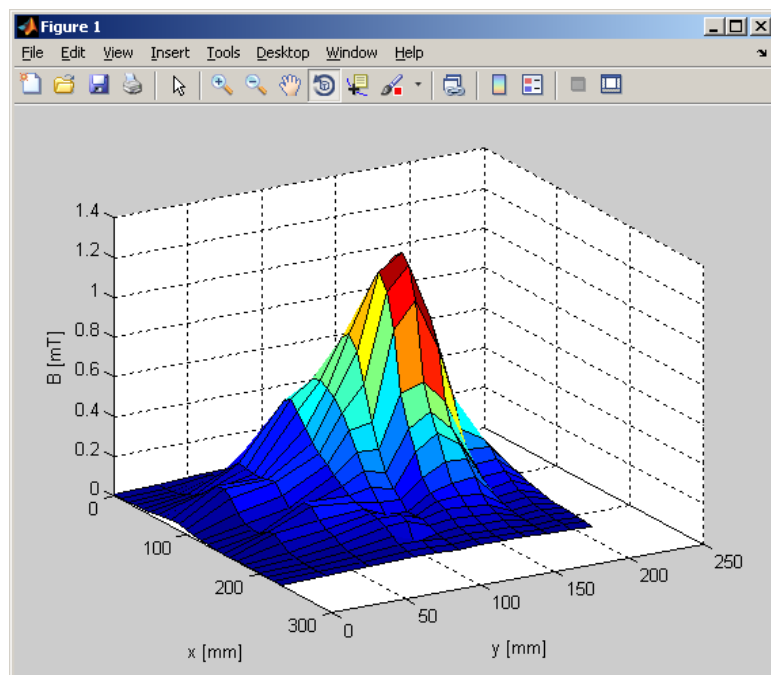


Obr. 61 Pracoviště pro mapování magnetického pole (vlevo) a pozice s nejvyšší hodnotou magnetické indukce (vpravo)

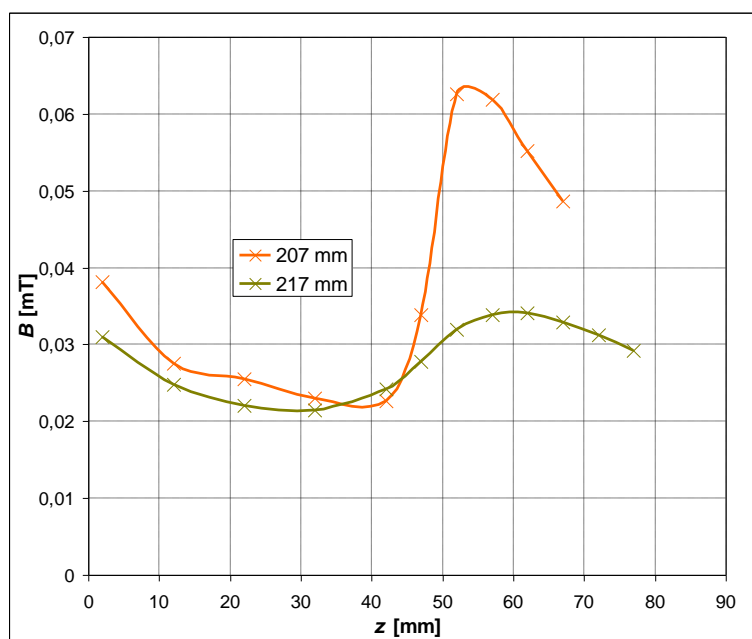
Vyrobený transformátor není symetrický podle montážního šroubu, což je patrné i z fotografie na obr. 61 vpravo. Na obr. 62 jsou graficky zobrazeny výsledky měření rozložení magnetického pole transformátoru. Z grafů na obr. 62 je patrné nižší vyzařování magnetického pole v dolní polovině transformátoru oproti jeho horní polovině s vyvedenými vývody primárního vinutí a vinutí sekundárních. Na obr. 63 je znázorněno naměřené magnetické pole v 3D grafu. Na obr. 64 je průběh magnetického pole na boku transformátoru.



Obr. 62 Rozložení magnetického pole ve výšce 10 mm nad transformátorem v jeho dolní polovině (vlevo) a horní polovině (vpravo)



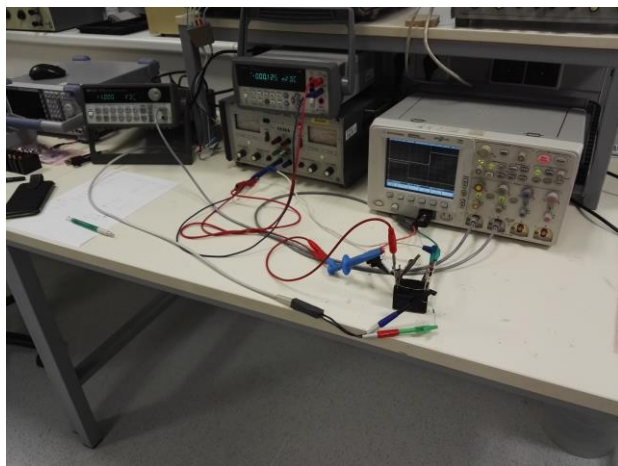
Obr. 63 3D pohled na rozložení magnetického pole ve výšce 10 mm nad transformátorem



Obr. 64 Průběh magnetického pole na boku transformátoru (řez osou z) pro $y = 90$ mm a dvě vzdálenosti x

8.2 Měření parametrů relé

Relé slouží ve stabilizovaném zdroji k přepínání vstupních odboček transformátoru. Je tedy důležité, aby se při přepínání odboček transformátoru nesepnula naráz dvě nebo více relé. Výrobce zakoupených součástek garantuje dobu sepnutí a rozepnutí jako čas, který trvá maximálně 30 ms. Z tohoto důvodu proběhlo měření doby sepnutí a rozepnutí zakoupených relé. Tedy, abychom měli přesnější údaje o jejich hodnotách. Na obr. 65 jsou dvě fotografie. Vlevo je fotografie měřicího pracoviště a vpravo je vyfocené jedno ze zakoupených relé.



Obr. 65 Vlevo ukázka měřicího pracoviště, vpravo fotografie měřeného relé.

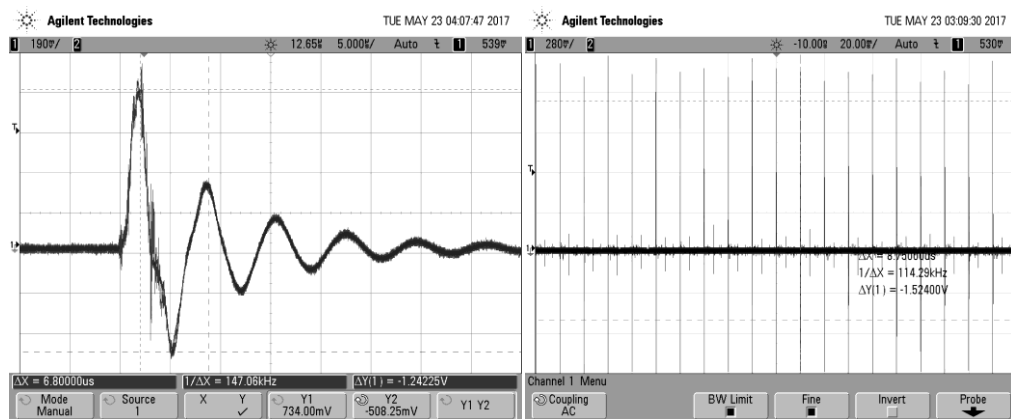
V tab. 26 jsou zapsány naměřené hodnoty konkrétních relé. Z naměřených údajů vyplývá, že doba rozepnutí je u všech měřených součástek kratší než doba sepnutí. To je vhodná varianta pro použití ve zdroji. Znamená to, že se jedno relé dokáže včas rozepnout a odpojit obvod dříve než se sepne druhé relé a nenastane tak varianta, že by se sepnuly dvě či více relé naráz. Kvůli případnému stárnutí se vyšší rezerva získá snížením napájecího napětí diodou na 11,5 V. Odpor relé v sepnutém stavu byl měřen obdobně jako odpor vinutí transformátoru a pohyboval se u všech relé okolo 1 mΩ.

Tab. 26 Skutečné, naměřené parametry použitých relé

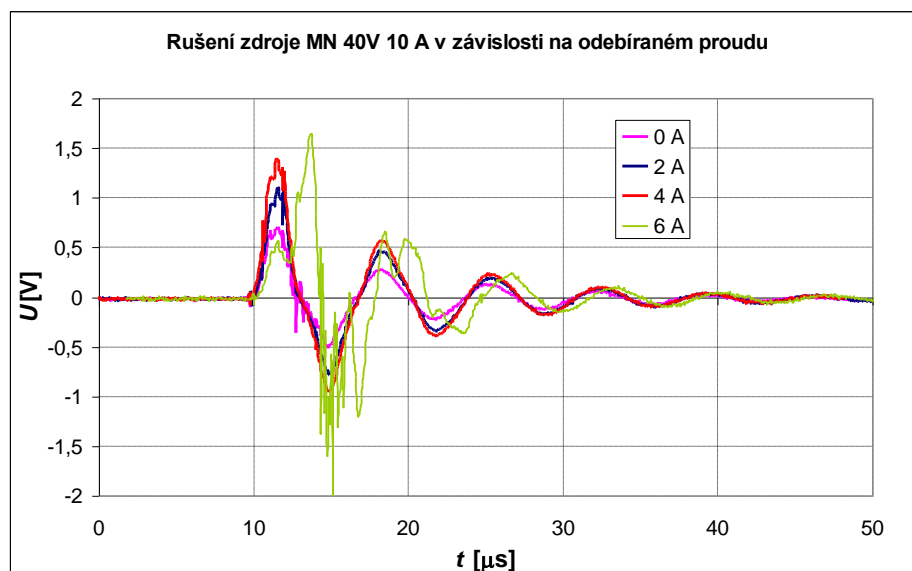
Číslo relé	Doba sepnutí [ms]	Doba rozepnutí [ms]	Napájecí napětí [V]
1	17,05	14,45	11,5
2	17,25	14,70	11,5
3	17,90	15,00	11,5
4	19,10	15,4	11,5
1	16,45	14,35	12,0
2	16,85	15,00	12,0
3	16,75	15,20	12,0
4	18,25	15,60	12,0

8.3 Měření rušení a šumu používaného zdroje MN 40V 10A

Pro porovnání s navrženým zdrojem se proměřily vlastnosti doposud používaného zdroje Mesit MN 40V 10A. Jelikož zdroj má tyristorovou předregulaci, objevují se na jeho výstupu při spínání tyristorů každých 10 ms nežádoucí oscilace o kmitočtu přibližně 150 kHz. Jinak ale plně splňuje svou specifikaci, kdy výrobce zaručuje méně jak 1 mV_{ef} rušení na jeho výstupu, pomocí milivoltmetru BM579 bylo naměřeno na jeho výstupu 0,52 mV (šířka pásma milivoltmetru 10 Hz až 15 MHz). Velikost rušení je navíc závislá na odebíraném proudu, s jeho zvyšováním vzrůstá. Hodnota špička-špička rušení je bez zátěže asi 1,24 V, při zatížení proudem 6 A pak 3 V. Impulzní rušení omezuje použití tohoto zdroje pro účely NQR, měření je nutné opakovat tak, aby se měřicí proces zrovna „trefil“ mimo rušení vznikající každých 10 ms. Výsledky měření jsou zobrazeny na obr. 66 a obr. 67.



Obr. 66 Vlevo detail rušení tyristorové předregulace při výstupním napětí 30 V, vpravo opakování těchto impulzů každých 10 ms

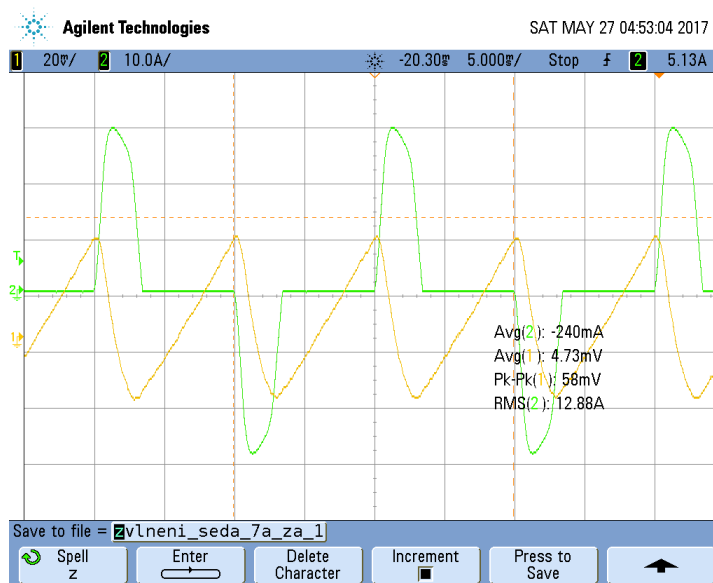


Obr. 67 Závislost nežádoucích oscilací na výstupu zdroje pro výstupní napětí 30 V a různé odebírané proudy

8.4 Měření zdrojové desky

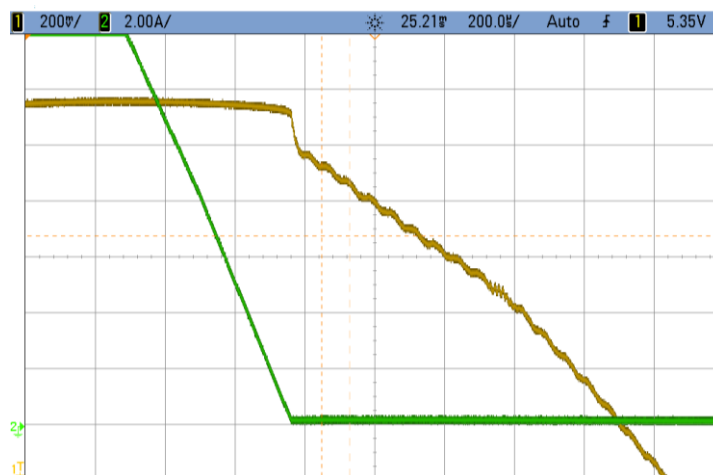
Po osazení do přístrojové krabice byla proměřena zdrojová deska a ověřeno magnetické vyzařování transformátoru, teplotní poměry uvnitř zdroje, zvlnění výstupního napětí a kmitání vlivem vypínání napájecích diod.

Po zatížení výstupu za násobičem kapacity stejnosměrným proudem 7 A byl změřen proudovou sondou průběh proudu sekundárním vinutím. Zjištěná hodnota 12,68 A odpovídá výpočtu a potvrzuje správný návrh filtru pomocí nomogramu. Bez osazeného tlumícího RC článku bylo měřeno kmitání v důsledku zavření diody. Ukázalo se, že jeho amplituda je malá. Pro podrobnější zhodnocení by bylo nutné použít spektrální analyzátor. Kmitání napětí na výstupu transformátoru je zobrazeno na obr. 68



Obr. 68 Kmitání napětí na výstupu transformátoru při zavření diody

Dále bylo změřeno zvlnění napětí před násobičem kapacity a za ním. Potvrdilo se vysoké potlačení zvlnění tímto obvodem. Na obr. 69 je zobrazeno zvlnění napětí za násobičem kapacity.



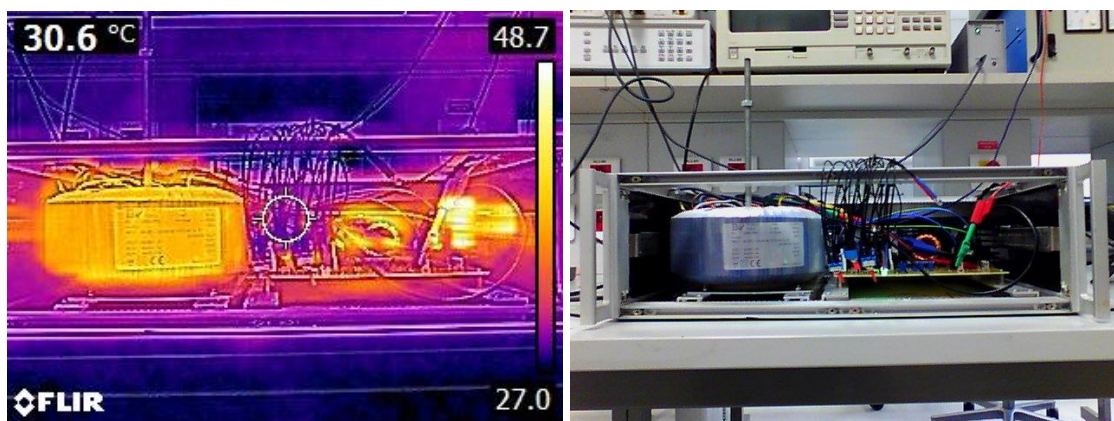
Obr. 69 Zvlnění napětí za násobičem kapacity

Nakonec se provedlo měření teploty uvnitř přístroje, které potvrdilo nízkou teplotu transformátoru, ale ukázala se vysoká teplota stabilizátoru 7812 pro napájení relé a ventilátorů. Proto byl použit daleko větší masivnější chladič. Výkonové rezistory 5 W od výrobce z Číny nakoupené v GME se ukázaly být nevhodné pro obvod soft startu, docházelo k jejich přerušování po několika zapnutích. Pro konečnou verzi zdroje budou použity kvalitní rezistory od českého výrobce Tesla Blatná, které mají nesrovnatelně vyšší kvalitu a impulsní zatížitelnost.

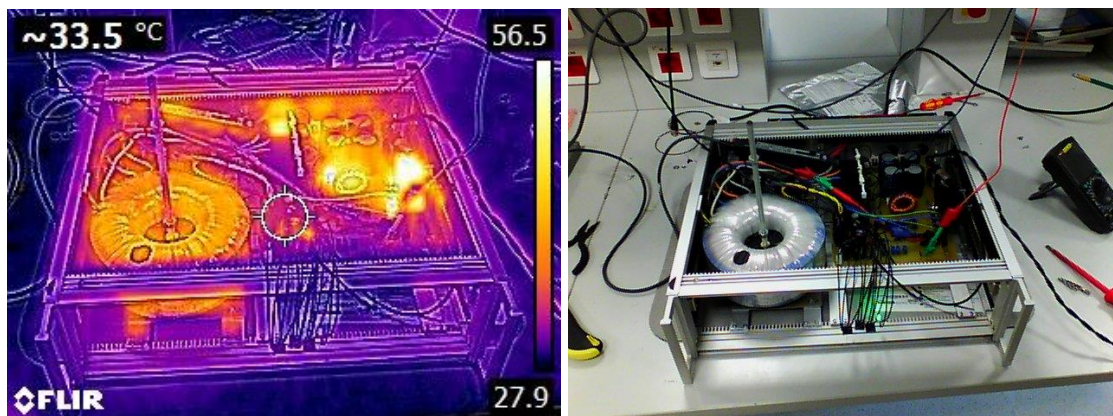
Během kontrolního měření magnetického vyzařování transformátoru se zvolilo vhodné natočení transformátoru ve skříni. V místě kde bude umístěna regulační deska je měřitelné magnetické pole přibližně 11- 27 uT. Magnetické pole kopíruje svým tvarem pulzní proud tekoucí do filtračního kondenzátoru.

8.5 Měření teplotní charakteristiky zdroje při zatížení

Při tomto měření byly deska pro ovládání softstartu a zdrojová deska namontovány do přístrojové krabice a při zapojeném ventilátoru, který byl zapojen přímo na 12 V a pracoval tedy na plný výkon. Tyto desky byly odzkoušeny při maximálním požadovaném zatížení. Maximálního požadovaného zatížení bylo dosaženo připojením desek ke dvěma reostatům. Pomocí reostatů se nastavil výstupní proud zdrojové desky na 7 A. Snímky zobrazené v této kapitole byly pořízeny po více jak hodině od zapnutí zdroje na maximální výkon. Na obr. 70 je zobrazen zdroj zepředu a na obr. 71 je vyfocen z vrchu. Na obrázcích je patrné, které části zdroje se nejvíce zahřívají. Jsou to výkonové části, kterými prochází největší proudy.

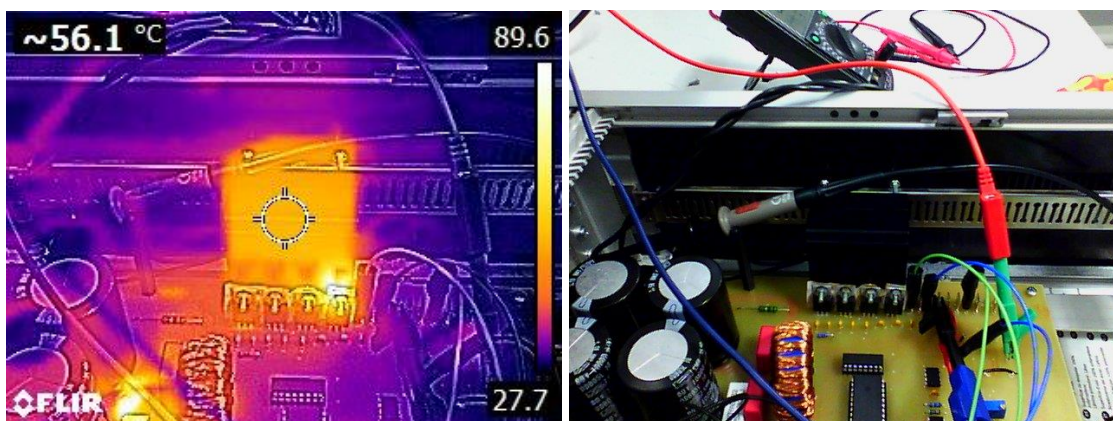


Obr. 70 Snímek pořízený termokamerou z přední strany zdroje

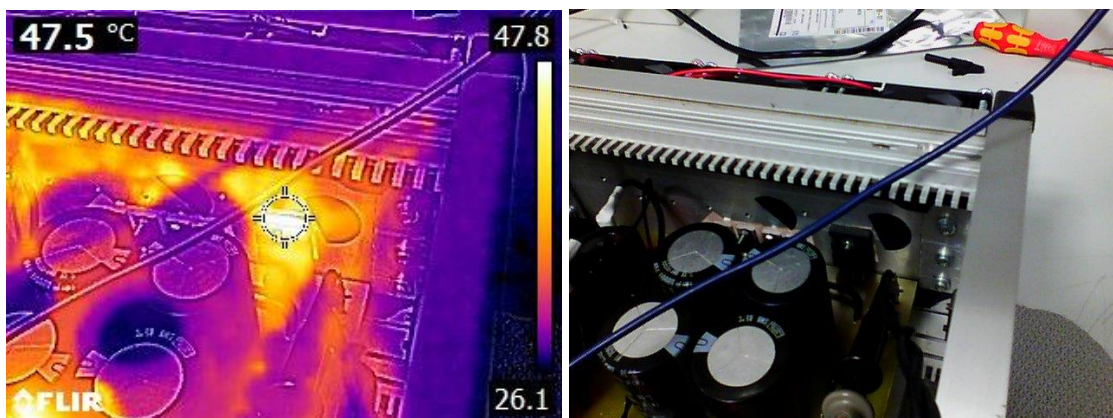


Obr. 71 Snímek pořízený termokamerou z vrchní strany zdroje

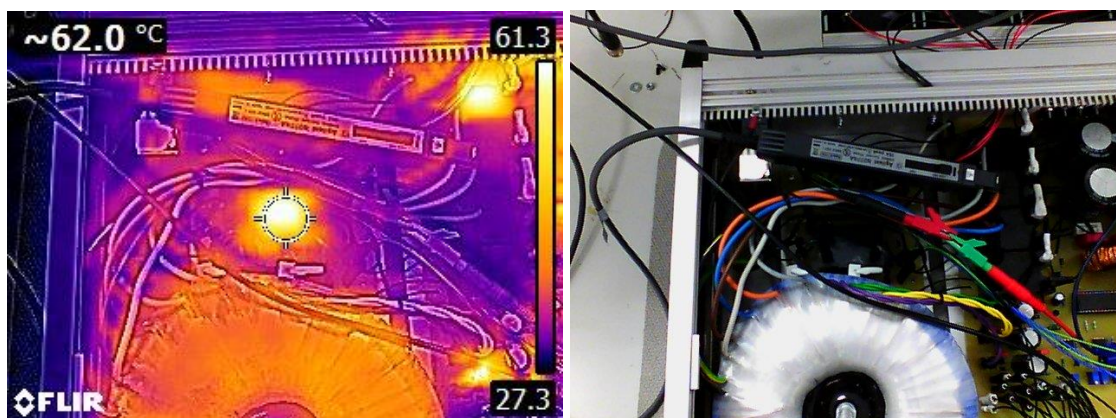
Na obr. 72 je zobrazeno zahřívání stabilizátorů a k nim přimontovaného chladiče. Z obrázku je patrné, že nejvíce se zahříval pravý stabilizátor 7812. První dva stabilizátory zleva jsou stabilizátory, které slouží k napájení operačních zesilovačů a při měření nebyly využívány. Proto se nejvíce zahříval jen pravý stabilizátor. Na obr. 73 je zobrazeno zahřívání chladiče a k němu připojeného výkonového tranzistoru. Obr. 74 zobrazuje zahřívání relé na desce softstartu, přes které prochází vstupní proud do transformátoru.



Obr. 72 Zahřívání stabilizátorů napětí



Obr. 73 zahřívání chladiče a výkonového tranzistoru



Obr. 74 Zahřívání relé na desce softstratu

9 ZÁVĚR

Závěrem bych chtěl zhodnotit celou bakalářskou práci. Její průběh, výsledky měření a nakonec i dosažené vlastnosti navrženého zdroje. Výsledkem této bakalářské práce má být nízkošumový, stabilizovaný a regulovatelný zdroj 50V/5A. V průběhu práce se oproti původnímu zadání změnila velikost požadovaného maximálního výstupního proudu zdroje. Velikost proudu se navýšila z důvodu, aby laboratorní zdroj mohl být používán nejen pro účely NQR, ale i pro měření NMR, které má požadavky na laboratorní zdroj v kontinuálním režimu 30V/6A a v pulzním režimu 50V/3A.

Postup celé bakalářské práce a následná výroba zdroje probíhala následovně. V zimním semestru v rámci semestrálního projektu se sepsala veškerá teoretická část obsažená v tomto dokumentu. Navrhl se celkový koncept zdroje, podle kterého se postupovalo několik následujících měsíců. Vypočítaly se parametry pro chlazení zdroje a podle těchto parametrů a zvolené konstrukční skříně se vybral chladič. Podle parametrů chladiče se spočítala a vybrala nejlepší varianta pro chlazení zdroje a to 4 výkonové tranzistory paralelně k sobě a přepínání mezi čtyřmi odbočkami na transformátoru po 12,5 V. Navrhl se transformátor se všemi dalšími vinutími a nechal se vyrobit. Dále se v zimním semestru vybrala většina důležitých nízkošumových součástek. V následujícím letním semestru se už v rámci bakalářské práce navrhly a vyrobily všechny desky plošných spojů. V rámci návrhu desek plošných spojů se většina částí zdroje odsimulovala v návrhovém simulátoru Pspice. Dále se v tomto semestru provedla měření různých částí zařízení zdroje. Nakonec se všechny desky osadily a probíhalo jejich ožívování.

V rámci ožívování navržených desek se našlo i několik chyb, které byly odhaleny až při ožívování nebo následné montáži desek do přístrojové skříně. Z hlediska montáže jsou některé součástky hůře dostupné a špatně se kvůli nim dostává k některým šroubům nebo k součástkám, které se přimontovávají na chladič. Při zapojování kabelů se zjistilo, že fastony, které jsou zapájeny v DPS by mohly být od sebe více vzdáleny. Tyto konstrukční chyby však nemají vliv na funkci a chod laboratorního zdroje. Při ožívování desek se však narazilo i na chyby, kvůli kterým by zdroj již fungovat nemohl. Tyto chyby byly ve zdroji opraveny, ale ve schématech použitých v tomto dokumentu zůstávají. Je to z důvodu, že opravená schémata by se neshodovala s deskami osazenými v zdroji. Veškeré nalezené chyby jsou popsány v tomto odstavci. První nalezená chyba byla na zdrojové desce. Bylo špatně zvoleno pouzdro diody MUR2020. Dioda má mít pouzdro TO220AC, místo toho bylo při návrhu omylem použito pouzdro TO220ACS, které je velmi podobné a má stejné rozměry, jen má opačně zapojené vývody pro anodu a katodu. Tato chyba byla na desce odstraněna pomocí přezáření dvou cest a nahrazení těchto cest dvěma drátovými propojkami. Další chyba, která byla nalezena při měření, je že rezistory na desce softstartu byly špatně zvoleny. Tato chyba se jednoduše opravila osazením jiných rezistorů. Při ožívování se objevilo i několik chyb na regulační desce. První z nich je špatně zapojený spoj v části pro regulaci napětí, který vede na zem. Tato chyba byla odstraněna odstraněním spoje a použitím drátové propojky. Druhá chyba, která se objevila, jsou špatně zvolené hodnoty odporové děliče v napěťové části, kdy zdroj nemohl regulovat do svého maxima 50 V. Tato chyba byla odstraněna vypájením rezistorů a jejich nahrazením rezistory se správnými hodnotami.

V rámci oživování zdroje probíhalo také měření parametrů hotových částí zdroje. Z časových důvodů se však nestihly naměřit všechny parametry, které jsem chtěl. Proběhlo měření zakoupeného transformátoru, kde se měřili, jeho výstupní parametry a rozložení magnetického pole. Transformátor se také měřil na prázdko bez zatížení a i s maximálním zatížením. Proběhlo měření parametrů zakoupených relé, z důvodu zjištění jejich přesné doby sepnutí a rozepnutí. Jako další měření proběhlo měření funkcí desky softstartu, která při měření fungovala. Dalším měřením, které na zdroji proběhlo, bylo měření zdrojové desky a desky softstartu při plném zatížení. Desky byly při tomto měření již osazeny v přístrojové skříni. V tomto měření obě dvě desky obstály. Desky byly maximálně zatíženy po dobu 2 hodin a teplota na chladičích a na součástkách nepřesáhla jejich maxima. Dále proběhlo měření výstupních parametrů zdroje při zapojení všech desek bez zatížení. Výstupní napětí zdroje se regulovalo podle předpokladů, jen na výstupu bylo naměřeno kmitání výstupního napětí, které se zatím nepodařilo odstranit. Deska pro regulaci ventilátoru vykazuje zatím z neznámých důvodů chyby, a proto byla při měřeních odpojena a ventilátory byly zapojeny přímo na napájení +12 V. Deska ventilátoru by měla být do obhajoby zprovozněna. Doměření zbylých měření je plánováno stihnout do obhajoby.

Konečným výstupem bakalářské práce je tedy zdroj, který dokáže regulovat výstupní napětí od 0 do 50 V a to pomocí potenciometru ve dvou režimech. V prvním režimu nastavením rozsahu výstupního napětí a jemným doladěním a ve druhém režimu hrubým doladěním potenciometrem přímo na požadované výstupní napětí. Zdroj zobrazuje výstupní hodnoty na dvou analogových panelových měřidlech. Dokáže dodávat maximální výstupní proud 7 A a dokáže také přepínat mezi napájením ze sítě a napájením z baterií.

LITERATURA

- [1] M. OSTAFIN, B. NOGAJ, “*¹⁴N-NQR based device for detection of explosives in landmines*“, Science direkt Measurement, 40 (2007) 43–54
- [2] R. KUBÁSEK, M. ALKHADDOUR, *Building NMR/NQR spectrometer*, in: *Proceedings Progress in Electromagnetics Research Symposium*, 2012, pp. 163–166.
- [3] PROCHÁZKA, M. *NQR spektroskopie - návrh metod měření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 61 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D.
- [4] STEINBAUER, M., KRÁL, B., FIALA, I., STANĚK, M., PROCHÁZKA, M., FIALA, P., SEGÍNÁK, J., DREXLER, P. Detection of Selected Chemical Substances by Means of Nuclear Quadrupole Resonance Detection of Selected Chemical Substances by Means of Nuclear Quadrupole Resonance. In *Proceedings of PIERS 2014 in Guangzhou. Progress In Electromagnetics*. 2014. s. 1036-1040. ISBN: 978-1-934142-28- 8. ISSN: 1559- 9450
- [5] PATOČKA, MIROSLAV. *Vybrané statě z výkonové elektroniky - svazek I: Tepelné jevy, činný výkon*. Brno: FEKT VUT BRNO, 2005.
- [6] ŠTĚPNIČKA, M. *Návrh měřiče VA charakteristik dvojpólů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 50 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D..
- [7] KALÁNEK, J. *Praktická realizace generátoru šumu*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2010. 38 s., 5 s. příloh. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radek Kubásek, Ph.D.
- [8] KRŮŽELA, MIROSLAV. *Stabilizátory napětí a jejich řešení*. Zlín, 2008. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [9] VÍT, T. *Řízený laboratorní zdroj*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 72s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Macho, Ph.D.
- [10] SYROVÁTKO, MILAN. *Navrhování napájecích zdrojů pro elektroniku*. Praha: SNTL, 1977. Řada elektrotechnické literatury.
- [11] HORÁK, MARTIN. *Lineární regulátor ss napětí s velmi nízkým šumem*. Praha, 2009. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaroslav Roztočil, CSc.
- [12] VRBA, KAMIL. *Konstrukce elektronických zařízení*. Brno, 2013. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací.
- [13] ČAPKA, JIŘÍ, ROMAN ŠOTNER. *Studium vybraných vlastností obvodů s operačními zesilovači v návrhu frekvenčních korektorů*. Elektrevue [online].

- Brno, 2013, (2) [cit. 2016-11-19]. ISSN 1213-1539.
- [14] HAUER, P. *Řízení laboratorního zdroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 62 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zoltan Szabo.
 - [15] DOSTÁL, TOMÁŠ. *Teorie obvodů*. Brno, 2006. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
 - [16] MIL-STD-202G METHOD 308, [online] [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: http://www.barringer1.com/mil_files/MIL-STD-202G.pdf
 - [17] NoiseKen NOISE LABORATORY, Resistor Current Noise Tester RCN-2011, [online][cit.2016-12-02]Dostupné z: <http://www.noiseken.com/uploads/photos0/176.pdf>
 - [18] SEIFERT, FRANK. *Resistor Current Noise Measurements* [online]. 2009, 14. Dostupné z: https://dcc.ligo.org/public/0002/T0900200/001/current_noise.pdf
 - [19] PETER, MÄRKI. White Paper thick film resistor flicker noise. [online]. [cit. 2016-12-02].Dostupné z: https://people.phys.ethz.ch/~pmaerki/public/resistor_flicker_noise/20130723a_white_paper_resistor_flicker_noise.pdf
 - [20] ŠIKULA, JOSEF, BOHUMIL KOKTAVÝ. *Šumová diagnostika kondenzátorů. Konstrukční katalog pasivní elektronické součástky*. Praha: ELTOS, 1991, s. 584-589.
 - [21] HARRISON, LINDEN T. *Current Sources and Voltage References: A Design Reference for Electronics Engineers*. Newnes, 2005. ISBN 978-0750677523.
 - [22] KULARATNA, NIHAL. *DC Power Supplies: Power Management and Surge Protection for Power Electronic Systems*. CRC Press, 2011. ISBN 978-0415802475.
 - [23] AD586: datasheet. *Analog devices* [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD586.pdf>
 - [24] LT1236: datasheet. *Linear technology* [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/lt1236.pdf>
 - [25] LT1021: datasheet. *Linear technology* [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1021fc.pdf>
 - [26] REF5010: datasheet. *Texas Instruments* [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ref5010.pdf>
 - [27] LM199: datasheet. *Linear Technology* [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/199399fc.pdf>
 - [28] REF01: datasheet. *Analog devices* [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/REF01_02_03.pdf
 - [29] OPA211: datasheet. *Texas Instruments* [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa2211a.pdf>
 - [30] OPA227: datasheet. *Texas Instruments* [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z:

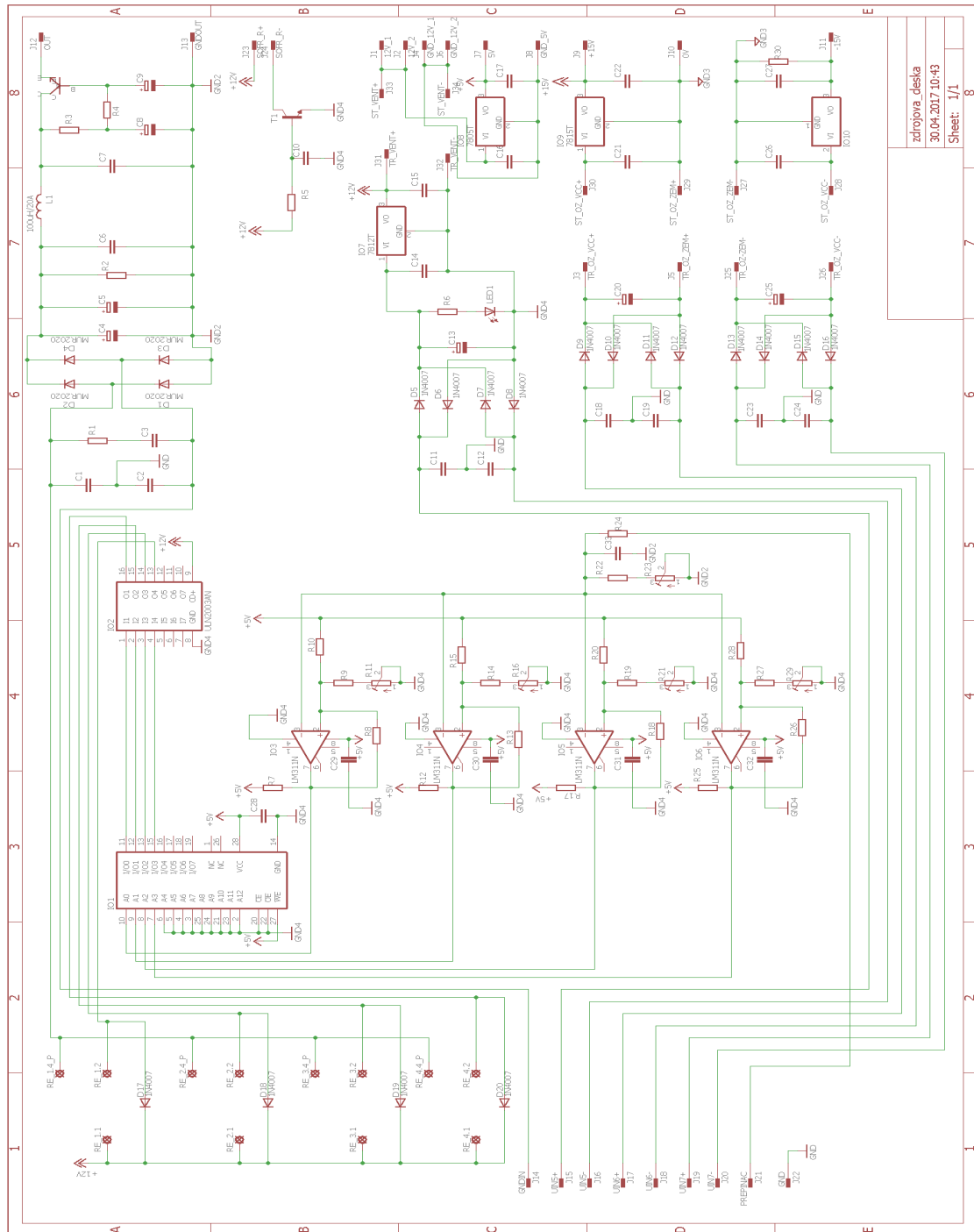
- <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa227.pdf>
- [31] LT1128: datasheet. *Linear Technology* [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1028fd.pdf>
- [32] AD8597: datasheet. *Analog devices* [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8597_8599.pdf
- [33] AD4898: datasheet. *Analog devices* [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4898-1_4898-2.pdf
- [34] MAX9632: datasheet. *Maxim Integrated* [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX9632.pdf>
- [35] LT6018: datasheet. *Linear Technology* [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/6018f.pdf>
- [36] MJL21196: datasheet. ON Semiconductor [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MJL21195-D.PDF
- [37] FN9290: datasheet. SCHAFFNER [online]. [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: <http://www.schaffner.com/products/download/product/datasheet/fn-9290-ultra-compact-and-versatile-filtered-power-entry-module/>
- [38] STABROVSKI, MAREK. Stabilizátory stejnosměrného napětí a proudu. Praha. 1975.
- [39] NOVOTNÝ, V., VOREL, P., PATOČKA, M. Napájení elektronických zařízení. Brno: FEI VUT v Brně. 1999. ISBN 80-214-1090-6
- [40] AGILENT E3633A, E3634A *DC Power Supplies service guide.*, 2000, 136 s.
- [41] Stabilizovaný zdroj Tesla BS525. Praha, 1976, 23 s.
- [42] POSPÍŠIL, FRANTIŠEK. *Laboratorní zdroj* [online]. [cit. 2016-12-03]. Dostupné z: <http://ok2jnj.ok2kld.cz/ok2jnj/2015/11/laboratorni-zdroj-uvod/>
- [43] Stray Field / Radiated Magnetic Field [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://www.nuvotem.com/en/products/stray_field.shtml
- [44] HAGERMAN, Jim. *Calculating Optimum Snubbers - Hagerman Audio Labs* [online]. 1995 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: www.hagtech.com/pdf/snubber.pdf
- [45] PATOČKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. 1. vyd. V Brně: VUT IUM, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

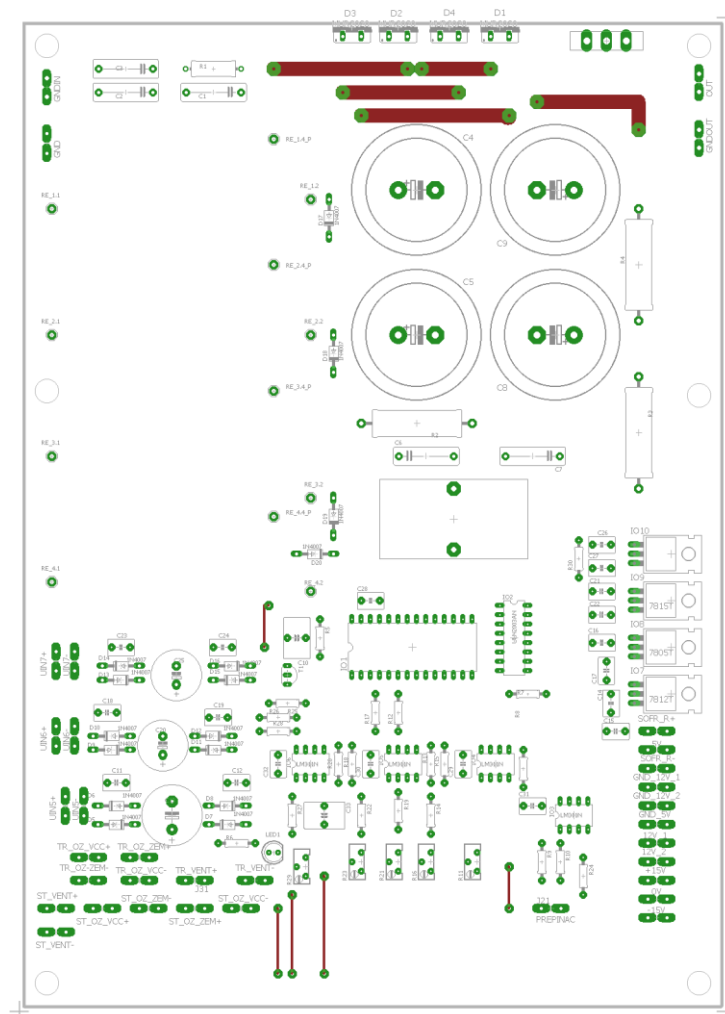
f	Kmitočet
L	Indukčnost
C	Kondenzátor
R	Rezistor
U_M	Vrcholová hodnota střídavého napětí
U_g	Vstupní střídavé napětí
k	Boltzmanova konstanta
T	Teplota
B_N	Šumová šířka pásma
I	Stojnosměrný proud
q	Náboj elektronu
G	Elektrická vodivost
U_{rms}	Efektivní hodnota napětíového šumu
OZ	Operační zesilovač
DPS	Deska plošných spojů
NQR	Nukleární kvadrupólová rezonance
NMR	Nukleární magnetická rezonance
R_{thca}	Tepelný odpor pouzdra součástky
R_{thcj}	Tepelný odpor polovodičového přechodu
R_{thcc}	Tepelný odpor přechodu mezi pouzdrem a chladičem
R_{thcl}	Tepelný odpor chladiče
U_{AV}	Napětí za sběracím kondenzátorem
R_S	Vnitřní odpor vinutí transformátoru
I_{AV}	Výstupní proud zdroje
R_L	Zatěžovací odpor
U_{Vef}	Zvlnění napětí
U_{ef}	Napětí na sekundárním vinutí
U_{2ef}	Napětí na sekundárním vinutí při poklesu napájecího napětí
I_{ef}	Proud sekundárním vinutím

A. NÁVRH ZAŘÍZENÍ

A.1 Obvodové zapojení zdrojové desky

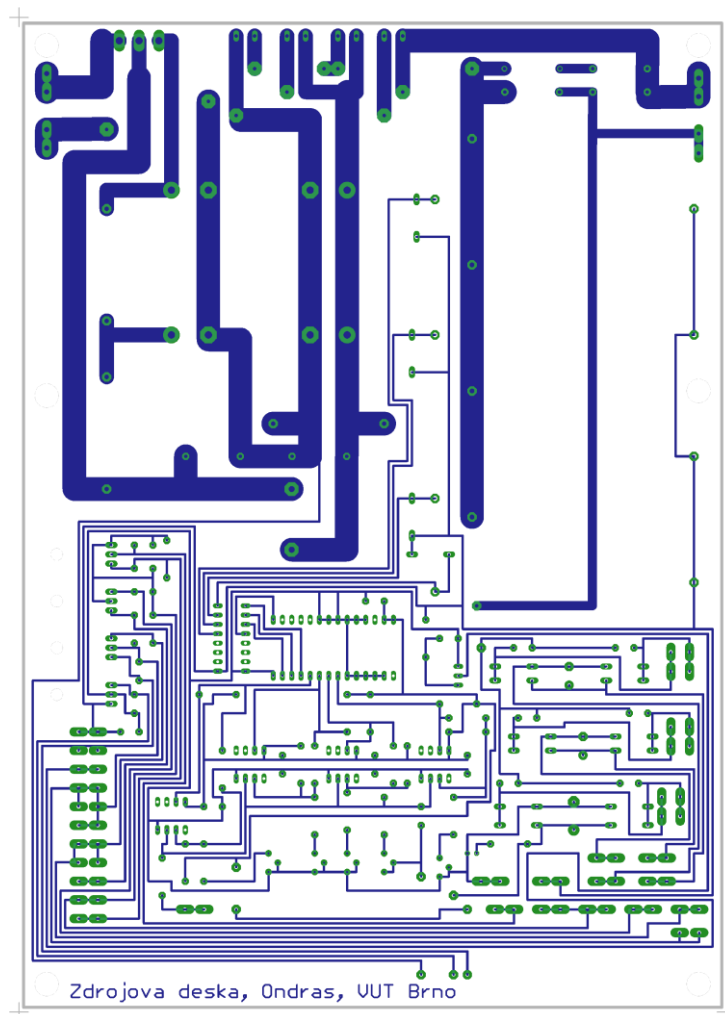


A.2 Zdrojová deska – strana součástek



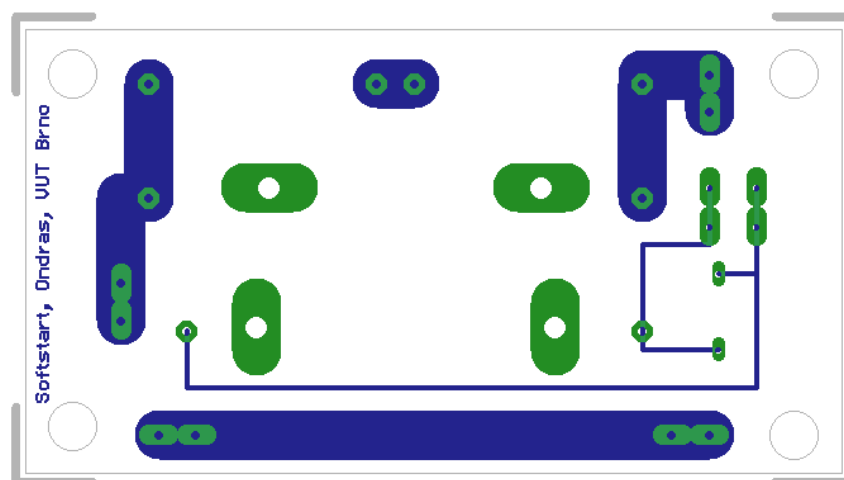
Rozměr desky 268 x 192 [mm], měřítko M1:2

A.3 Zdrojová deska – strana spojů



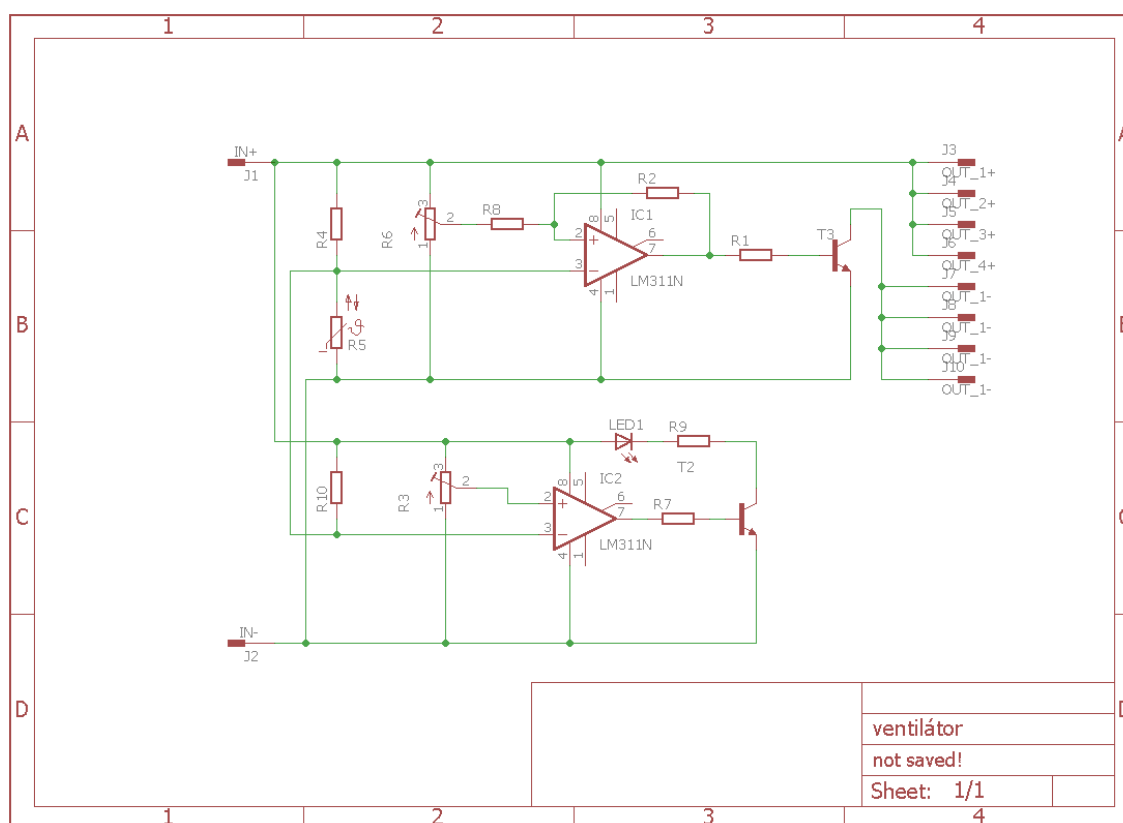
Rozměr desky 268 x 192 [mm], měřítko M1:2

A.6 Deska softstartu – strana spojů

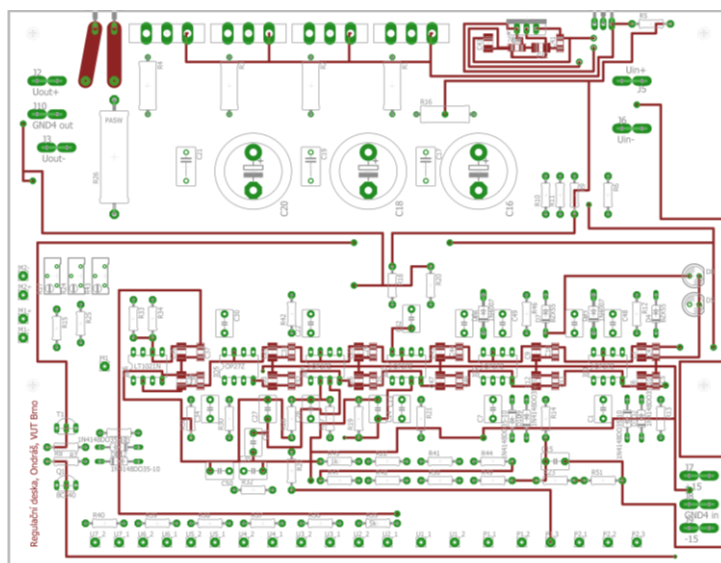


Rozměr desky 63 x 112 [mm], měřítko M1:1

A.7 Obvodové zapojení desky ventilátoru

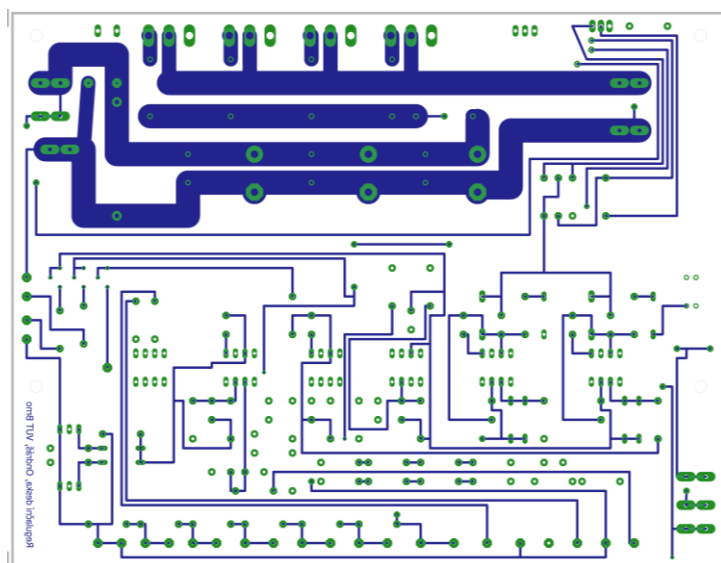


A.11 Regulační deska – strana součástek



Rozměr desky 148 x 191 [mm], měřítko M1:2

A.12 Regulační deska – strana spojů



Rozměr desky 148 x 191 [mm], měřítko M1:2

B. SEZNAM SOUČÁSTEK

B.1 Zdrojová deska

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
R1	-	0414/15	Drátový rezistor
R2	-	PA5W	Drátový rezistor
R3	-	PA5W	Drátový rezistor
R4	-	PA5W	Drátový rezistor
R5	10k	0207/10	Drátový rezistor
R6	8k2	0207/10	Drátový rezistor
R7	-	0207/10	Drátový rezistor
R8	-	0207/10	Drátový rezistor
R9	-	0207/10	Drátový rezistor
R10	-	0207/10	Drátový rezistor
R11	-	RTRIM64Y	Trimr
R12	680	0207/10	Drátový rezistor
R13	33k	0207/10	Drátový rezistor
R14	3k3	0207/10	Drátový rezistor
R15	3k9	0207/10	Drátový rezistor
R16	500	RTRIM64Y	Trimr
R17	1k	0207/10	Drátový rezistor
R18	47k	0207/10	Drátový rezistor
R19	10k	0207/10	Drátový rezistor
R20	3k9	0207/10	Drátový rezistor
R21	1k	RTRIM64Y	Trimr
R22	820	0207/10	Drátový rezistor
R23	500	RTRIM64Y	Trimr
R24	10k	0207/10	Drátový rezistor
R25	270	0207/10	Drátový rezistor
R26	15k	0207/10	Drátový rezistor
R27	820	0207/10	Drátový rezistor

Označení	Hodnota	Pouzdro	Drátový rezistor
R28	3k9	0207/10	Drátový rezistor
R29	500	RTRIM64Y	Trimr
R30	2k2	0207/10	Drátový rezistor
C1	4,7 nF	C150-054X183	Keramický kondenzátor
C2	4,7 nF	C150-054X183	Keramický kondenzátor
C3	-	C150-054X183	Keramický kondenzátor
C4	10 mF	EB35D	Elektrolytický kondenzátor
C5	10 mF	EB35D	Elektrolytický kondenzátor
C6	-	C150-054X183	Keramický kondenzátor
C7	-	C150-054X183	Keramický kondenzátor
C8	10 mF	EB35D	Elektrolytický kondenzátor
C9	10 mF	EB35D	Elektrolytický kondenzátor
C10	220 µF	C050-055X110	Keramický kondenzátor
C11	4,7 nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C12	4,7 nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C13	3,3 mF	E2,5-6	Elektrolytický kondenzátor
C14	330 nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C15	100 nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C16	330 mF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C17	100 nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C18	4,7 nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C19	4,7 nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C20	3,3 mF	E2,5-6	Elektrolytický kondenzátor
C21	330 nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C22	100 nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C23	4,7 nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C24	4,7 nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C25	3,3 mF	E2,5-6	Elektrolytický kondenzátor
C26	2,2 µF	E2,5-6	Elektrolytický kondenzátor
C27	1 µF	E2,5-6	Elektrolytický kondenzátor
C28	100 nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C29	100 nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C30	100 nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C31	100 nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C32	100 nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C33	100 nF	C050-075X110	Keramický kondenzátor
D1	MUR2020	TO220AC	Usměrňovací dioda
D2	MUR2020	TO220AC	Usměrňovací dioda
D3	MUR2020	TO220AC	Usměrňovací dioda
D4	MUR2020	TO220AC	Usměrňovací dioda
D5	1N4007	DO41-10	Usměrňovací dioda
D6	1N4007	DO41-10	Usměrňovací dioda
D7	1N4007	DO41-10	Usměrňovací dioda
D8	1N4007	DO41-10	Usměrňovací dioda
D9	1N4007	DO41-10	Usměrňovací dioda
D10	1N4007	DO41-10	Usměrňovací dioda
D11	1N4007	DO41-10	Usměrňovací dioda
D12	1N4007	DO41-10	Usměrňovací dioda
D13	1N4007	DO41-10	Usměrňovací dioda
D14	1N4007	DO41-10	Usměrňovací dioda
D15	1N4007	DO41-10	Usměrňovací dioda
D16	1N4007	DO41-10	Usměrňovací dioda
D17	1N4007	DO41-10	Usměrňovací dioda
D18	1N4007	DO41-10	Usměrňovací dioda
D19	1N4007	DO41-10	Usměrňovací dioda
D20	1N4007	DO41-10	Usměrňovací dioda
IO1	28C64C	DIL28-6	EEPROM paměť
IO2	ULN2003AN	DIL16	Integrovaný obvod
IO3	LM311N	DIL08	Komparátor
IO4	LM311N	DIL08	Komparátor
IO5	LM311N	DIL08	Komparátor
IO6	LM311N	DIL08	Komparátor

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
IO7	7812T	TO220H	Stabilizátor napětí
IO8	7805T	TO220H	Stabilizátor napětí
IO9	7815T	TO220H	Stabilizátor napětí
IO10	7915T	TO220H	Stabilizátor napětí
L1	100 μ H	L_40X20	Cívka
LED1	LED	LED5MM	Zelená LED
RELE1	HE1AN12DC	AHE1211	Relé
RELE2	HE1AN12DC	AHE1211	Relé
RELE3	HE1AN12DC	AHE1211	Relé
RELE4	HE1AN12DC	AHE1211	Relé
T1	BC635	TO92-ECB	Tranzistor
T2	MJ121196	TO-264	Tranzistor

B.2 Softstart deska

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
R1	10 Ω	PA5W	Drátový rezistor
R2	10 Ω	PA5W	Drátový rezistor
Rele	HE1AN12DC	AHE1211	Relé
D1	-	DO41-10	Usměrňovací dioda

B.3 Deska ventilátoru

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
R1	10 k Ω	0207/10	Drátový rezistor
R2	10 k Ω	0207/10	Drátový rezistor
R3	10 k Ω	RTRIM64Y	Trimr
R4	10 k Ω	0207/10	Drátový rezistor
R5	10 k Ω	K164NK0010	Termistor NTC
R6	10 k Ω	RTRIM64Y	Trimr
R7	10 k Ω	0207/10	Drátový rezistor

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
R8	10 k Ω	0207/10	Drátový rezistor
R9	470 Ω	0207/10	Drátový rezistor
R10	10 k Ω	0207/10	Drátový rezistor
T1	BD139	TO126	Tranzistor
T2	BC337	TO92-CBE	Tranzistor
LED1	-	LED5MM	Červená LED
IO1	LM311N	DIL08	Komparátor
IO2	LM311N	DIL08	Komparátor

B.4 Regulační deska

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
R1	0,02	P0613/15	Rezistor
R2	0,02	P0613/15	Rezistor
R3	0,02	P0613/15	Rezistor
R4	0,02	P0613/15	Rezistor
R5	100	0207/10	Drátový rezistor
R6	47	0207/10	Drátový rezistor
R7	-	0207/10	Drátový rezistor
R8	-	0207/10	Drátový rezistor
R9	1k	0207/10	Drátový rezistor
R10	10	0207/10	Drátový rezistor
R11	2k2	0207/10	Drátový rezistor
R12	2k2	0207/10	Drátový rezistor
R13	47R	0207/10	Drátový rezistor
R14	47R	0207/10	Drátový rezistor
R15	-	0207/10	Drátový rezistor
R16	0,02	P0613/15	Rezistor
R17	-	RTRIM64Y	Trimr
R18	100	0207/10	Drátový rezistor
R19	500	0207/10	Drátový rezistor

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
R20	100	0207/10	Drátový rezistor
R21	500	0207/10	Drátový rezistor
R22	500	0207/10	Drátový rezistor
R23	500	0207/10	Drátový rezistor
R24	50k	RTRIM64Y	Trimr
R25	470k	0207/10	Drátový rezistor
R26	2k2 5W	PA5W	Drátový rezistor
R27	-	0207/10	Drátový rezistor
R28	-	0207/10	Drátový rezistor
R29	2k2	0207/10	Drátový rezistor
R30	-	0207/10	Drátový rezistor
R31	-	0207/10	Drátový rezistor
R32	2k2	0207/10	Drátový rezistor
R33	-	0207/10	Drátový rezistor
R34	15k	0207/10	Drátový rezistor
R35	500	0207/10	Drátový rezistor
R36	500	0207/10	Drátový rezistor
R37	500	0207/10	Drátový rezistor
R38	500	0207/10	Drátový rezistor
R39	500	0207/10	Drátový rezistor
R40	500	0207/10	Drátový rezistor
R41	500	0207/10	Drátový rezistor
R42	-	0207/10	Drátový rezistor
R43	-	RTRIM64Y	Trimr
R44	500	0207/10	Drátový rezistor
R45	500	0207/10	Drátový rezistor
R46	2k2	0207/10	Drátový rezistor
R47	500	0207/10	Drátový rezistor
R48	500	0207/10	Drátový rezistor
R49	500	0207/10	Drátový rezistor
R50	500	0207/10	Drátový rezistor

Označení	Hodnota	0207/10	Popis
R51	500	0207/10	Drátový rezistor
R52	-	0207/10	Drátový rezistor
C1	-	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C2	22p	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C3	6μ8/25V	B/3528-21R	Tantalový kondenzátor
C4	100n	C1206	SMD kondenzátor
C5	100n	C1206	SMD kondenzátor
C6	6μ8/25V	B/3528-21R	Tantalový kondenzátor
C7	-	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C8	22p	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C9	6μ8/25V	B/3528-21R	Tantalový kondenzátor
C10	100n	C1206	SMD kondenzátor
C11	100n	C1206	SMD kondenzátor
C12	6μ8/25V	B/3528-21R	Tantalový kondenzátor
C13	470μ	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C14	470μ	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C15	470μ	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C16	-	EB20D	Elektrolytický kondenzátor
C17	-	C075-052X106	Keramický kondenzátor
C18	-	EB20D	Elektrolytický kondenzátor
C19	-	C075-052X106	Keramický kondenzátor
C20	-	EB20D	Elektrolytický kondenzátor
C21	-	C075-052X106	Keramický kondenzátor
C22	22p	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C23	6μ8/25V	B/3528-21R	Tantalový kondenzátor
C24	100n	C1206	SMD kondenzátor
C25	100n	C1206	SMD kondenzátor
C26	6μ8/25V	B/3528-21R	Tantalový kondenzátor
C27	22μ/16V	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C28	-	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C29	6μ8/25V	B/3528-21R	Tantalový kondenzátor

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C30	22p	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C31	100n	C1206	SMD kondenzátor
C32	100n	C1206	SMD kondenzátor
C33	6 μ 8/25V	B/3528-21R	Tantalový kondenzátor
C34	-	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C35	22 μ /16V	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C36	6 μ 8/25V	B/3528-21R	Tantalový kondenzátor
C37	100n	C1206	SMD kondenzátor
C38	100n	C1206	SMD kondenzátor
C39	6 μ 8/25V	B/3528-21R	Tantalový kondenzátor
C40	100n	C1206	SMD kondenzátor
C41	100n	C1206	SMD kondenzátor
C42	6 μ 8/25V	B/3528-21R	Tantalový kondenzátor
C43	6 μ 8/25V	B/3528-21R	Tantalový kondenzátor
C44	100n	C1206	SMD kondenzátor
C45	6 μ 8/25V	B/3528-21R	Tantalový kondenzátor
C46	100n	C1206	SMD kondenzátor
C47	6 μ 8/25V	B/3528-21R	Tantalový kondenzátor
C48	-	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C49	-	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C50	22 μ /16V	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C51	22 μ /16V	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C52	-	C050-045X075	Keramický kondenzátor
D1	1N4007	DO41-10	Usměrňovací dioda
D2	1N4148	DO35-10	Usměrňovací dioda
D3	1N4148	DO35-10	Usměrňovací dioda
D4	BZX55	DO35Z10	Zenerova dioda
D5	LED	LED5MM	LED dioda
D6	1N4007	DO41-10	Usměrňovací dioda
D7	BZX55	DO35Z10	Zenerova dioda
D8	LED	LED5MM	LED dioda

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
D9	1N4148	DO35-10	Usměrňovací dioda
D10	1N4148	DO35-10	Usměrňovací dioda
D11	MUR2020	TO220AC	Usměrňovací dioda
D12	1N4148	DO35-10	Usměrňovací dioda
D13	1N4148	DO35-10	Usměrňovací dioda
IO1	LT1128	DIL08	Komparátor
IO2	LT1128	DIL08	Komparátor
IO3	LT1128	DIL08	Komparátor
IO4	LT1128	DIL08	Komparátor
IO5	LT1128	DIL08	Komparátor
IO6	LT1021	DIL08	Stabilizátor napětí
IO7	7808	TO220	Stabilizátor napětí
T1	BC639	TO92	Tranzistor
T2	MJ121196	TO-264	Tranzistor
T3	MJ121196	TO-264	Tranzistor
T4	MJ121196	TO-264	Tranzistor
T5	MJ121196	TO-264	Tranzistor
T6	BD139	T0126	Tranzistor
T7	BC640	TO92	Tranzistor

C. POUŽITÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

Označení	Název	Typ	Třída přesnosti	Sériové číslo
V ₁	HVL	Feromagnetický 60-600 V	0,5	30232
V ₂	34401A	Multimetr	0,06MH+0,03MR	MY45001 592
V ₃	MUL10	Magnetoelektrický s usměrňovačem 2,4-600 V	1,5	238843
V ₄	34401A	Multimetr	0,06MH+0,03MR	MY41002 582
V ₅	DU20	Multimetr	1	6974774
A ₁	HLA	Feromagnetický 0,6-6 A	0,5	30246
A ₂	HLA	Feromagnetický 0,6-6 A	0,5	30245
A ₃	34401A	Multimetr	0,15MH+0,06MR	6029938
W ₁	HEW _a	Elektrodynamický 15-600 V 5A cosφ=0,2	1	80785419
W ₂	PsLL	Elektrodynamický 60-600 V 5V	0,2	788641
MTP ₁	SLL5P	Proudový transformátor 0,5-10A/5A	0,2	4764676
MTP ₂	SLL1	Proudový transformátor 0,5-100A/5A	0,1	A1194443
Osciloskop	DSO6052A	500 MHz 4 GSa/s	2%	
RLCG	BM595	Měřič impedance	0,2 %	911006
G	460	Gaussmetr 3 osý	0,2 %	
	-	3 osá sonda 10 Hz- 400 Hz	-	
	N2774A	Proudová sonda 50 MHz	1 %	JP420020 46
	-	Napěťová sonda	1 %	
Z1	LTS 606	Regulační trafo 250 V/ 6 A	-	3643
Z2				
R ₁	-	Reostat 2,15 Ω 16 A	-	33997
R ₂	-	Reostat 2,15 Ω 16 A	-	33974

D. FOTODOKUMENTACE

